



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ
LASER ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.**

υπό

ΤΑΪΓΑΝΙΔΟΥ ΠΟΛΥΜΝΙΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	7611/1
Ημερ. Εισ.:	23-10-2009
Δωρεά:	Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜ
	2009
	ΤΑΙ

© 2009 Πολύμνια Ταϊγανίδου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω πολλές ευχαριστίες στην Δρ. Άννα Ζερβάκη, μέλος του εργαστηρίου υλικών για την πολύτιμη βοήθειά της, την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές της. Επίσης είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Νικόλαο **Απόβα** και κ. Αλέξιο Κερμανίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Ευχαριστώ τις συναδέλφους και φίλες Παναγιώτα Καραστογιάννη και Γεωργία Πολυζογωπούλου για την συνεργασία και την παράλληλη εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών. Ευχαριστώ τις φίλες μου Χρύσα και Κατερίνα για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου, την μητέρα μου Σωτηρία Ταϊγανίδου, την αδελφή μου Νόπη Ταϊγανίδου και τον αδελφό μου Θοδωρή Ταϊγανίδη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την διπλωματική εργασία στην οικογένειά μου.

Μεταλλουργική διερεύνηση της κόπωσης σε συγκολλήσεις laser αεροπορικών κραμάτων αλουμινίου.

ΤΑΪΓΑΝΙΔΟΥ ΠΟΛΥΜΝΙΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Τμήματος
Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εργαστηριακή διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης σε as received καθώς και σε διαβρωμένα δοκίμια συγκολλήσεων laser των κραμάτων αλουμινίου 2139 – T3, 2139 – T8 και 6156 – T4. Στα μη διαβρωμένα δείγματα η έναρξη της κύριας ρωγμής κόπωσης εντοπίζεται στη Ζώνη Μερικής Τήξης, με την ενίσχυση να παίζει καθοριστικό ρόλο λόγω της δημιουργίας εγχοπών στην επιφάνεια. Αντίθετα στα διαβρωμένα δείγματα η θερμική κατεργασία του κράματος φαίνεται ότι επηρεάζει τη συμπεριφορά σε διάβρωση και κατά συνέπεια και την αντοχή σε κόπωση. Στα κράματα 2139 – T3 και 6156 – T4 η έναρξη της κόπωσης εντοπίζεται στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης όπου και δημιουργείται έντονη τρημματική διάβρωση, ενώ στο 2139 – T8 η περιοχή της συγκόλλησης παραμένει ανεπηρέαστη από τη διάβρωση που εντοπίζεται στο μέταλλο βάσης όπου και αστοχεί λόγω κόπωσης. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από την παρουσία φάσεων που αναπτύσσονται στα όρια των κόκκων του υλικού κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	14
2.1 Αλουμίνιο – Κράματα αλουμινίου	14
2.1.1 Ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του	14
2.1.2 Κράματα αλουμινίου	15
2.2 Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx	17
2.3 Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 6xxx	19
2.4 Συγκόλληση με δέσμη laser	20
2.5 Κόπωση	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Πειραματική διαδικασία	24
3.1 Υλικά	24
3.2 Κοπή	29
3.3 Μακροσκοπικός και μικροσκοπικός έλεγχος	29
3.4 Μικροσκληρομέτρηση	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αποτελέσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων	30
4.1 Κράμα 2139 – T3	30
4.1.1 Αδιάβρωτα δοκίμια	31
4.1.2 Δοκίμια που έχουν υποστεί αλατονέφωση για διάστημα 30 ημερών	44
4.2 Κράμα 2139 – T8	60
4.2.1 Αδιάβρωτα δοκίμια	61
4.2.2 Δοκίμια που έχουν υποστεί αλατονέφωση για διάστημα 30 ημερών	71
4.3 Κράμα 6156 – T4	92
4.3.1 Αδιάβρωτα δοκίμια	92
4.3.2 Δοκίμια που έχουν υποστεί αλατονέφωση για διάστημα 30 ημερών	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακα 2.1: Η χημική σύσταση των κραμάτων της σειράς 6xxx (%κ.β.)	19
Πίνακα 3.1: Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 2139	24
Πίνακα 3.2: Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 6156	24
Πίνακα 3.3: Παράμετροι συγκόλλησης με Nd:YAG laser	24
Πίνακα 3.4: Συνθήκες δοκιμής κόπωσης για το κράμα 2139 – T3	26
Πίνακα 3.5: Συνθήκες δοκιμής κόπωσης για το κράμα 2139 – T8	27
Πίνακα 3.6: Συνθήκες δοκιμής κόπωσης για το κράμα 6156 – T4	27
Πίνακας 4.22: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης	42
Πίνακας 4.24: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης	43
Πίνακας 4.49: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης	58
Πίνακας 4.50: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης	59
Πίνακας 4.68: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης	70
Πίνακας 4.69: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης	70
Πίνακας 4.101: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης	88
Πίνακας 4.102: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες Whoeler του κράματος 2139 – T3	31
Διάγραμμα 4.3: Προφίλ μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 2139 – T3	31
Διάγραμμα 4.51: Καμπύλες Whoeler του κράματος 2139 – T8	60
Διάγραμμα 4.52: Προφίλ μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 2139 – T8	60
Διάγραμμα 4.106: Καμπύλες Whoeler του κράματος 6156 – T4	91
Διάγραμμα 4.107: Προφίλ μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 6156 – T4	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2: Σχηματική παράσταση του Nd:YAG laser	20
Σχήμα 2.3: Εφαρμογές συγκολλήσεων στην αεροναυπηγική	21
Σχήμα 2.4: Εφαρμογές συγκολλήσεων στην αεροναυπηγική	21
Σχήμα 2.5: Εφαρμογές συγκολλήσεων στην αεροναυπηγική	22
Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής κόπωσης	23
Σχήμα 3.7: Αδιάβρωτο δοκίμιο του κράματος 2139 – T3	28
Σχήμα 3.8: Διαβρωμένο δοκίμιο του κράματος 2139 – T3	28
Σχήμα 4.1: Η μικροδομή ενός μετάλλου συγκόλλησης.	30
Σχήμα 4.4: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 6 ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).	32
Σχήμα 4.5: Μακρογραφία δοκιμίου 6a.	33
Σχήμα 4.6: Μακρογραφία δοκιμίου 6b.	33
Σχήμα 4.7: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 6a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).	34
Σχήμα 4.8: Εγκοπή στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 6b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).	34
Σχήμα 4.9: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 7 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$).	35
Σχήμα 4.10: Μακρογραφία δοκιμίου 7a.	36
Σχήμα 4.11: Μακρογραφία δοκιμίου 7a.	36
Σχήμα 4.12: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 7a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$).	37
Σχήμα 4.13: Δεν εμφανίζονται άλλες ρωγμές κόπωσης στο δοκίμιο 7b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$)	37
Σχήμα 4.14: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 8 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).	38
Σχήμα 4.15: Μακρογραφία δοκιμίου 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).	39
Σχήμα 4.16: Μακρογραφία δοκιμίου 8b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).	39
Σχήμα 4.17: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).	40
Σχήμα 4.18: Πόροι στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 8b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).	40
Σχήμα 4.19: Πόροι στο κέντρο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).	41
Σχήμα 4.20: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 8a ($\sigma_{\max} = 150$,	41

Nf = 1.025.613,50).

Σχήμα 4.21: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 8b ($\sigma_{\max} = 150$, Nf = 1.025.613,50).	42
Σχήμα 4.23 : Τρόπος μέτρησης της κλίσης ενίσχυσης της συγκόλλησης.	43
Σχήμα 4.25: Μακρογραφία του δοκιμίου 2 ($\sigma_{\max} = 65$, Nf = 10.248.000).	44
Σχήμα 4.26: Εμφάνιση έντονης διάβρωσης στη ρίζα του δοκιμίου 2 ($\sigma_{\max} = 65$, Nf = 10.248.000).	45
Σχήμα 4.27: Περικρυσταλλική διάβρωση στο δοκίμιο 2 ($\sigma_{\max} = 65$, Nf = 0.248.000).	46
Σχήμα 4.28: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 3 ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628)	46
Σχήμα 4.29: Μακρογραφία δοκιμίου 3a ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628)	47
Σχήμα 4.30: Μακρογραφία δοκιμίου 3b ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628).	48
Σχήμα 4.31: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 3a ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628).	48
Σχήμα 4.32: Έντονη τρημματική διάβρωση στη συγκόλληση στο δοκίμιο 3a ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628).	49
Σχήμα 4.33: Το φαινόμενο της διάβρωσης δεν συνεχίζεται μακριά από τη συγκόλληση στο δοκίμιο 3b ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628).	49
Σχήμα 4.34: Πιθανή έναρξη ρωγμής κόπωσης λόγω ύπαρξης εγκοπής στο δοκίμιο 3a ($\sigma_{\max} = 75$, Nf = 857.628).	50
Σχήμα 4.35: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 4 ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	50
Σχήμα 4.36: Μακρογραφία δοκιμίου 4a ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	51
Σχήμα 4.37: Μακρογραφία δοκιμίου 4b ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	52
Σχήμα 4.38: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στο πρόσωπο της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 4a ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	52
Σχήμα 4.39: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 4a ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	53
Σχήμα 4.40: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 4b ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	53
Σχήμα 4.41: Πιθανή έναρξη ρωγμής κόπωσης λόγω ύπαρξης εγκοπής στο δοκίμιο 4b ($\sigma_{\max} = 100$, Nf = 344.410).	54
Σχήμα 4.42: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 5 ($\sigma_{\max} = 150$, Nf = 78.446).	54
Σχήμα 4.43: Μακρογραφία δοκιμίου 5a ($\sigma_{\max} = 150$, Nf = 78.446).	55
Σχήμα 4.44: Μακρογραφία δοκιμίου 5b ($\sigma_{\max} = 150$, Nf = 78.446).	56
Σχήμα 4.45: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στο πρόσωπο της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 5a ($\sigma_{\max} = 150$, Nf = 78.446).	56

Σχήμα 4.46: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 5b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).	57
Σχήμα 4.47: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 5b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).	57
Σχήμα 4.48: Το μέταλλο της συγκόλλησης δεν έχει ανοχή στη διάβρωση στο δοκίμιο 5a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).	58
Σχήμα 4.53: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 15 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	61
Σχήμα 4.54: Μακρογραφία δοκιμίου 15a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	62
Σχήμα 4.55: Μακρογραφία δοκιμίου 15b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	63
Σχήμα 4.56: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 15a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	63
Σχήμα 4.57: Πόροι στο κέντρο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 15b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	64
Σχήμα 4.58: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 15b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	64
Σχήμα 4.59: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 15a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).	65
Σχήμα 4.60: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 26 ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	65
Σχήμα 4.61: Μακρογραφία δοκιμίου 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	66
Σχήμα 4.62: Μακρογραφία δοκιμίου 26b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	67
Σχήμα 4.63: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	67
Σχήμα 4.64: Διάδοση της ρωγμής κόπωσης στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	68
Σχήμα 4.65: Ελάχιστο πορώδες και έντονη ενίσχυση στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	68
Σχήμα 4.66: Το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 26b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	69
Σχήμα 4.67: Η ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 26b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).	69
Σχήμα 4.70: Απόσταση της θραύσης από τη συγκόλληση σε διαβρωμένο δοκίμιο κράματος 2139 – T8.	71
Σχήμα 4.71: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 9 ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	72
Σχήμα 4.72: Επιλογή τομής a – b του δοκιμίου 9 ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	72
Σχήμα 4.73: Μακρογραφία του δοκιμίου 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	73
Σχήμα 4.74: Μακρογραφία του δοκιμίου 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	74

Σχήμα 4.75: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	74
Σχήμα 4.76: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	75
Σχήμα 4.77: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	75
Σχήμα 4.78: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	76
Σχήμα 4.79: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	76
Σχήμα 4.80: Έντονη διάβρωση μακριά από τη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).	77
Σχήμα 4.81: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 10 ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	77
Σχήμα 4.82: Επιλογή τομής a – b του δοκιμίου 10 ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	78
Σχήμα 4.83: Μακρογραφία του δοκιμίου 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	79
Σχήμα 4.84: Μακρογραφία του δοκιμίου 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	79
Σχήμα 4.85: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	80
Σχήμα 4.86: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	80
Σχήμα 4.87: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	81
Σχήμα 4.88: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	81
Σχήμα 4.89: Έντονη διάβρωση μακριά από τη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	82
Σχήμα 4.90: Έντονη διάβρωση μακριά από τη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).	82
Σχήμα 4.91: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 12 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	83
Σχήμα 4.92: Μακρογραφία του δοκιμίου 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	84
Σχήμα 4.93: Μακρογραφία του δοκιμίου 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	84
Σχήμα 4.94: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	85
Σχήμα 4.95: Περικρυσταλλική διάβρωση στο δοκίμιο 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	85

Σχήμα 4.96: Εκκίνηση τόξων στο σημείο όπου παρουσιάζεται έντονη τρημματική διάβρωση στο δοκίμιο 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	86
Σχήμα 4.97: Εκκίνηση ρωγμής στο πρόσωπο του δοκιμίου 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	86
Σχήμα 4.98: Διάδοση ρωγμής στο δοκίμιο 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	87
Σχήμα 4.99: Διακρυσταλλική ρωγμή στο δοκίμιο 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	87
Σχήμα 4.100: Διακρυσταλλική ρωγμή στο δοκίμιο 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).	88
Σχήμα 4.103: Μικροδομή ΘΕΖ – διαλυτοποίηση 2mm από τη συγκόλληση.	90
Σχήμα 4.104: Μικροδομή ΘΕΖ – διεύρυνση 4mm από τη συγκόλληση.	90
Σχήμα 4.105: Μικροδομή βασικού μετάλλου.	91
Σχήμα 4.108: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 20 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	93
Σχήμα 4.109: Μακρογραφία δοκιμίου 20a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	94
Σχήμα 4.110: Μακρογραφία δοκιμίου 20b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	94
Σχήμα 4.111: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 20a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	95
Σχήμα 4.112: Διάδοση ρωγμής κόπωσης στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 20a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	95
Σχήμα 4.113: Μη ύπαρξη πόρων στη ρίζα και στο κέντρο της συγκόλλησης του δοκιμίου 20b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	96
Σχήμα 4.114: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 20b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).	96
Σχήμα 4.115: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 16 ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).	97
Σχήμα 4.116: Μακρογραφία του δοκιμίου δοκιμίου 16a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).	98
Σχήμα 4.117: Μακρογραφία του δοκιμίου δοκιμίου 16b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).	99
Σχήμα 4.118: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 16a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).	99
Σχήμα 4.119: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 16b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).	100
Σχήμα 4.120: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 16b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).	100

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η ανάγκη για ανάπτυξη κραμάτων αλουμινίου με βελτιωμένες ιδιότητες ανοχής στη βλάβη οδήγησε στη δημιουργία των νέων κραμάτων 2139 και 6156 τα οποία παρουσιάζουν ικανοποιητικό συνδυασμό ιδιοτήτων μηχανικής αντοχής, δυσθραυστότητας και αντοχής σε κόπωση. Στο κράμα 2139 προστίθενται ελεγχόμενες ποσότητες Ag (0.3 – 0.4%) και Mg (0.4 – 0.5%) προκειμένου να δημιουργηθεί η φάση Ω , η οποία κατά τη γήρανση πυρηνώνεται στο επίπεδο {111} στη μήτρα του αλουμινίου και δίδει εξαιρετικό συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων.

Η συγκόλληση με laser δίδει τη δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης των κραμάτων αυτών στην αεροναυπηγική. Εξαιτίας όμως της κατεργασίας της συγκόλλησης αναπτύσσεται μια νέα κατάσταση μικροδομής τόσο στη λίμνη συγκόλλησης όσο και στη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, λόγω των μετασχηματισμών φάσεων που συμβαίνουν, και οδηγούν σε μεταβολή της αντοχής των κραμάτων στις συγκεκριμένες περιοχές.

Η διάβρωση επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της τελικής μηχανικής αντοχής εξαιτίας των τοπικών εγχοπών που δημιουργούνται στην επιφάνεια και οι οποίες λειτουργούν ως σημεία έναρξης των ρωγμών.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εργαστηριακή διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας οι οποίοι αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης σε μετωπικές συγκολλήσεις του κράματος 2139 σε κατάσταση T3 και T8 και του κράματος 6156 σε κατάσταση T4. Τα υλικά αυτά είχαν συγκολληθεί με Nd:YAG laser και στη συνέχεια υπεβλήθησαν σε δοκιμές κόπωσης τόσο σε κατάσταση as received όσο και έπειτα από έκθεσή τους σε δοκιμή αλατονέφωσης. Οι δοκιμές κόπωσης και αλατονέφωσης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση




2.1 Αλουμίνιο – Κράματα αλουμινίου





Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου το καθιστούν μια από τις πλέον χρήσιμες βιομηχανικές πρώτες ύλες, που χαρακτήρισαν μεγάλα βήματα της ανθρωπότητας το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα. Το αλουμίνιο είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που συναντάται στο φλοιό της γης. Το αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό βωξίτης, που μετά την εξόρυξή του μετατρέπεται σε αλουμίνα, με τη μέθοδο Bayer, και στη συνέχεια, με ηλεκτρολυτική μέθοδο, μετατρέπεται σε μέταλλο αλουμίνιο.

2.1.1 Ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από τη μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων χημικών στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ.), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος.

Το αλουμίνιο έχει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, ιδιοτήτων, φυσικών χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών που επιδεικνύουν τα τόσα κράματά του. Συνοπτικά:

-  Έχει χαμηλό ειδικό βάρος. Μόλις το 1/3 εκείνου του σιδήρου.
-  Διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελάσσεται, διελάσσεται, συγκολλάται, συνεπώς αποτελεί ιδανικό μέταλλο κατασκευών. Το μέτρο ελαστικότητάς του (70.000 MPa) είναι 3 φορές χαμηλότερο από εκείνο του σιδήρου. Σε δεδομένη κατάσταση φόρτισης, μια κατασκευή από αλουμίνιο παρουσιάζει 3 φορές μεγαλύτερη ελαστική επιμήκυνση από ότι μία σιδερένια.
-  Το αλουμίνιο και τα περισσότερα κράματά του είναι πολύ ανθεκτικά σε πολλές μορφές διάβρωσης. Λόγω της μεγάλης χημικής συνάφειας με το οξυγόνο, η φυσική επιφάνεια του μετάλλου είναι μόνιμα καλυμμένη με στρώμα οξειδίου του αργιλίου, που αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό εμπόδιο διάδοσης της διάβρωσης.

-  Το αλουμίνιο είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.
-  Δεν μαγνητίζεται και δεν καίγεται, ιδιότητες που θεωρούνται πολύ ουσιώδεις για ειδικές εφαρμογές όπως κατασκευές θαλάσσης (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου).
-  Δεν είναι τοξικό, είναι αδιαπέραστο για διάφορα περιβάλλοντα μέσα.
-  Τέλος έχει υψηλή ανακλαστικότητα και πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια του σιδήρου). Ιδιότητες πολύ χρήσιμες για τις μονώσεις και γενικότερα τις εφαρμογές στην οικοδομή. [6]

2.1.2 Κράματα αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτά που μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία και σε αυτά που δεν μπορούν. Τα θερμικώς μη κατεργάσιμα κράματα περιέχουν μικρά ποσά στοιχείων όπως μαγγάνιο, πυρίτιο, σίδηρο και μαγνήσιο σε στερεό διάλυμα. Τα κράματα αυτά μπορούν να ισχυροποιηθούν με εν ψυχρώ κατεργασία. Τα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα περιέχουν στοιχεία όπως ο χαλκός, μαγνήσιο, ψευδάργυρος και πυρίτιο. Δεδομένου ότι αυτά τα στοιχεία σε διάφορους συνδυασμούς παρουσιάζουν αυξανόμενη στερεά διαλυτότητα, στο αλουμίνιο με την αυξανόμενη θερμοκρασία, είναι δυνατόν να υποβληθούν στις θερμικές επεξεργασίες που θα μεταδώσουν έντονη ενίσχυση.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει ενός διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το, σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο, κραματοποιό στοιχείο.

Σειρά 1xxx: καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα.

Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Το καθαρό αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στην διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και την εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.

Σειρά 2xxx: κράματα Al - Cu

Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών με απαίτηση υψηλές μηχανικές αντοχές.

Σειρά 3xxx: κράματα Al - Mn

Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση και η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους.

Σειρά 4xxx: κράματα Al - Si

Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.

Σειρά 5xxx: κράματα Al - Mg

Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι η πολύ καλή συγκολλητικότητα, η πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, η πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον και οι μέσες μηχανικές αντοχές.






Σειρά 6xxx: κράματα Al - Si - Mg

Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ.

Σειρά 7xxx: κράματα Al - Zn



Ο ψευδάργυρος με το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματικά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία. [5]





Το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο είναι σημαντικά στη 1xxx σειρά αλλά όχι στις υπόλοιπες. Στην 1xxx σειρά τα τελευταία δύο ψηφία περιγράφουν την ελάχιστη καθαρότητα του αλουμινίου. Στις υπόλοιπες σειρές αλουμινίων το τρίτο και τέταρτο ψηφίο είναι απλοί αύξοντες αριθμοί. Το δεύτερο ψηφίο δείχνει κάποιες τροποποιήσεις κραμάτων και έχει μια περίεργη λειτουργία, δείχνει μια στενή σχέση μεταξύ των κραμάτων, κατά συνέπεια το κράμα 5352 συσχετίζεται πολύ με το 5052 και το 5252 ενώ τα κράματα 7075 και 7475 διαφέρουν μόνο ελαφρώς στην σύνθεση. Τα κράματα αλουμινίου μετά τον τετραψήφιο αριθμό συνοδεύονται από τον συμβολισμό της διεργασίας που ακολουθήθηκε κατά την παραγωγή τους. Τα βασικότερα σύμβολα είναι:

-  F: Το κράμα παρέμεινε ως είχε μετά την παραγωγή.
-  O: Ανοπτημένο, έχει υποστεί ανακρυστάλλωση.
-  H: Έχει υποστεί ψυχρή έλαση. Η αντοχή του αυξάνεται από την κατεργασία εν ψυχρώ, μετά την οποία μπορεί να ακολουθήσει θερμική κατεργασία για ανόπτηση. Το H πάντα ακολουθείται από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν τη θερμική κατεργασία.
-  W: Θερμικά κατεργασμένο με στερεό διάλυμα παρεμβολής.
-  T: Θερμικά κατεργασμένο κράμα. Το T ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν τη θερμική κατεργασία:
 - 3: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια διαμόρφωση εν ψυχρώ.
 - 4: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια φυσική γήρανση.
 - 5: Τεχνητή γήρανση
 - 6: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια τεχνητή γήρανση.
 - 8: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής, στη συνέχεια τεχνητή γήρανση και τέλος διαμόρφωση εν ψυχρώ.
 - 9: Τεχνητή γήρανση και στη συνέχεια διαμόρφωση εν ψυχρώ. [4]

2.2 Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 2xxx ανήκουν στην κατηγορία των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου. Το κύριο κραματικό στοιχείο της σειράς είναι ο χαλκός (Cu). Ο χαλκός είναι το πιο κοινό κραματικό στοιχείο σχεδόν από την αρχή της βιομηχανίας του αλουμινίου. Αναπτύχθηκαν ποικίλα κράματα στα οποία ο χαλκός είναι η σημαντικότερη προσθήκη. Τα περισσότερα από αυτά τα κράματα ανήκουν σε μια από τις ακόλουθες ομάδες.

-  Χυτά κράματα με 5% Cu : συχνά με μικρές ποσότητες πυριτίου και μαγνησίου.
-  Χυτά κράματα με 7-8% Cu : τα οποία περιέχουν συχνά μεγάλες ποσότητες σιδήρου και πυριτίου και αξιόλογες ποσότητες μαγγανίου, χρωμίου, ψευδάργυρου, κασσίτερου, κ.λ.π.

-  Χυτά κράματα με 10-14% Cu : αυτά τα κράματα μπορούν να περιέχουν μικρές ποσότητες Mg (0,10-0,30%), Fe (μέχρι 1,5%), Si (μέχρι 5%) και μικρότερες ποσότητες Ni, Mn και Cr.
-  Κατεργασμένα κράματα με 5-6% Cu : και συχνά με μικρές ποσότητες Mn, Si, Cd, Bi, Sn, Li, V και Zr. Τα κράματα αυτά που περιέχουν το μόλυβδο, το βισμούθιο και το κάδμιο έχουν την ανώτερη κατασκευασιμότητα.
-  Duralis : η βασική σύνθεση αυτών των κραμάτων είναι 4-4,5%Cu, 0,5-1,5Mg, 0,5-1,0%Mn και μερικές φορές με προσθήκη πυριτίου.
-  Κράματα χαλκού που περιέχουν νικέλιο, το οποίο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο ομάδες : ο τύπος κραμάτων Y, του οποίου η βασική σύνθεση είναι 4%Cu, 2%Ni και 1,5%Mg και ο Hyduminiums, ο οποίος έχει συνήθως το χαμηλότερο περιεχόμενο χαλκού.

Τα επεξεργασμένα προϊόντα αποτελούνται από μια μήτρα του στερεού διαλύματος αλουμινίου, με τα άλλα συστατικά να διασκορπίζονται μέσα σε αυτήν. Τα συστατικά που διαμορφώνονται στα κράματα μπορούν να διαιρεθούν σε δυο ομάδες : τα διαλυτά συστατικά, τα οποία είναι αυτά που περιέχουν ένα ή περισσότερα από το χαλκό, λίθιο, μαγνήσιο, πυρίτιο και ψευδάργυρο, και τα αδιάλυτα συστατικά που περιέχουν τουλάχιστον ένα από τα στοιχεία σίδηρο, μαγγάνιο και νικέλιο.

Ο τύπος διαλυτών συστατικών που διαμορφώνονται, εξαρτάται όχι μόνο από το διαθέσιμο ποσό διαλυτών στοιχείων αλλά και από την αναλογία τους. Ο διαθέσιμος χαλκός εξαρτάται από το περιεχόμενο σιδήρου, μαγγανίου και νικελίου. Το διαθέσιμο ποσό πυριτίου ως ένα ορισμένο βαθμό ελέγχει τις ενώσεις χαλκού που σχηματίζονται. [7]

Τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα περιέχουν φάσεις, που εμφανίζονται σε διάφορες ποσότητες και διάφορες περιοχές στη δομή, και εξαρτώνται από τη θερμική κατεργασία του δοκιμίου. Στις σειρές κραμάτων 2xxx, η διαλυτή φάση είναι η CuAl_2 ή CuMgAl_2 .

Στο κράμα 2139, δεν υπάρχει η φάση θ (CuAl_2 ή CuMgAl_2). Η προσθήκη του Ag και του Mg ευνοεί την πυρήνωση της φάσης Ω , που αναπτύσσεται στο επίπεδο $\{111\}$ στη μήτρα του κράματος. Αυτή η φάση αυξάνει την αντοχή του κράματος.

2.3 Η σειρά κραμάτων αλουμινίου δxxx

Τα κύρια συστατικά των κραμάτων αυτών είναι το Mg και το Si. Στις σειρές κραμάτων δxxx, η πιο κοινή ενδομεταλλική φάση είναι η Mg_2Si . Η χημική σύσταση των κραμάτων εμφανίζεται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Η χημική σύσταση των κραμάτων της σειράς δxxx (% κ.β.).

Mg	0.2 – 1.5%	Cu	up to 2%
Si	0.2 – 2%	Zn	up to 2.5%
Mn	up to 1.5%	B, Ti, Zr	up to 0.3%
Cr	up to 0.5%	Pb, Bi	up to 1%

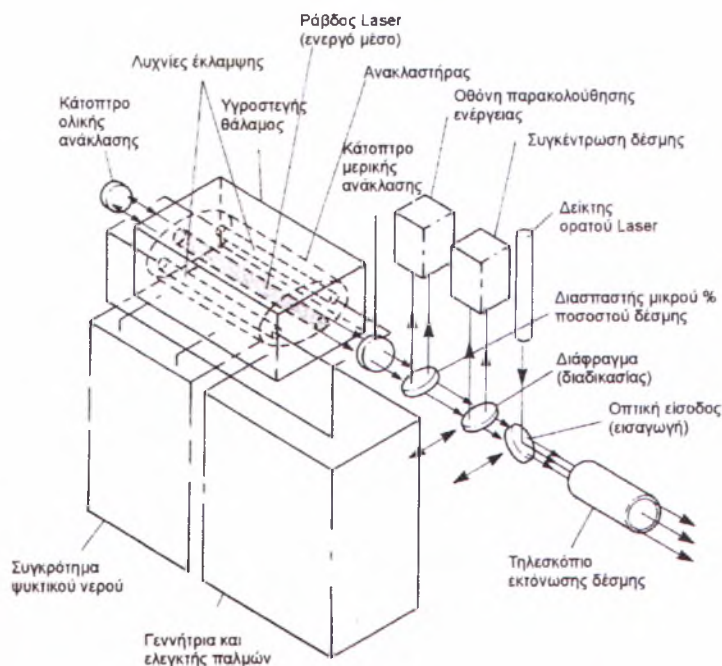
Η κατάλληλη αναλογία για το Mg_2Si είναι $Mg/Si = 1.73$ αλλά αυτό είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Κατά συνέπεια τα περισσότερα κράματα έχουν είτε το μαγνήσιο σε περίσσεια είτε το πυρίτιο. Η περίσσεια στο μαγνήσιο οδηγεί στην καλύτερη αντίσταση διάβρωσης αλλά σε χαμηλότερη αντοχή, ενώ η περίσσεια στο πυρίτιο παράγει υψηλότερη αντοχή, χωρίς επίπτωση στη συγκολλησιμότητα του κράματος.

Η δομή των κραμάτων είναι σχετικά απλή. Το κύριο συστατικό είναι η φάση Mg_2Si . Ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), το χρώμιο (Cr) και ο ψευδάργυρος (Zn) εμφανίζονται συνήθως σε πολύ μικρές ποσότητες και έχουν μικρή επίδραση. Ο σίδηρος, το τιτάνιο, το βόριο κ.α. δεν έχουν καμία ουσιαστική επίδραση. Στα περισσότερα κράματα το ποσό στοιχείων εκτός από το μαγνήσιο και το πυρίτιο είναι αρκετά κάτω από 1% και σπάνια επάνω από 3%. Κατά συνέπεια, πολλές ιδιότητες δεν διαφέρουν ουσιαστικά από εκείνες των τριμερών κραμάτων ή ακόμα και του καθαρού αλουμινίου.

Τα κράματα της σειράς αυτής παρουσιάζουν καλή συγκολλησιμότητα. Η αντοχή σε διάβρωση των συγκολλήσεων είναι πολύ κοντά σε αυτήν του μετάλλου βάσεως. Η καθίζηση στα όρια των κόκκων λόγω της θερμότητας της συγκόλλησης μπορεί να προκαλέσει ευθραυστότητα στη συγκόλληση. Το υψηλό ποσοστό πυριτίου στη συγκόλληση μειώνει ουσιαστικά τη δημιουργία ρωγμών, σε αντίθεση με το μαγνήσιο που οδηγεί σε δημιουργία ρωγμών. [7]

2.4 Συγκόλληση με δέσμη laser

Η πιο σημαντική ιδιότητα του Nd: YAG laser είναι ότι η δέσμη που μπορεί να μεταδοθεί μέσω οπτικής ίνας (με μήκος κύματος 1,06 μm). Η ιδιότητα αυτή κάνει το Nd: YAG laser κατάλληλο για υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης σε αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής. Η σχηματική διάταξη του Nd: YAG laser φαίνεται στο σχήμα 2.2. [1]

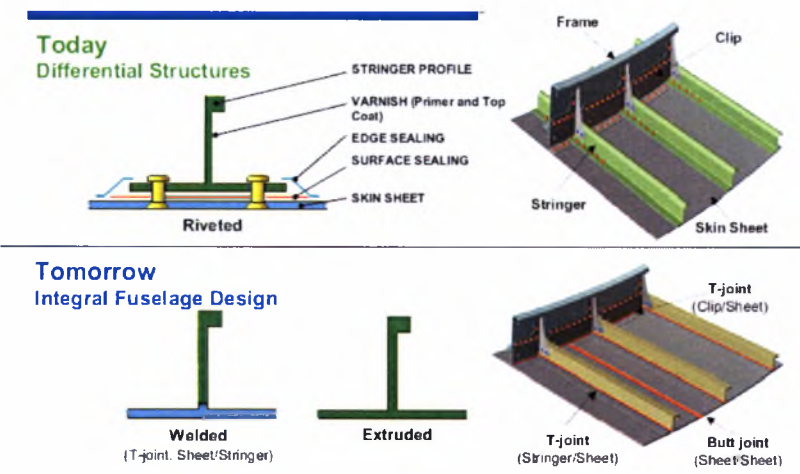


Σχήμα 2.2: Σχηματική παράσταση του Nd:YAG laser.

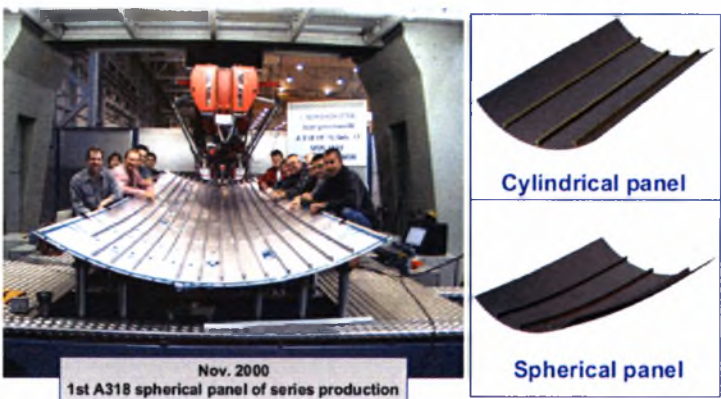
Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα για την ένωση τμημάτων ατράκτου αεροσκαφών στην αεροναυπηγική, είναι η συνένωση κραμάτων αλουμινίου με ηλώσεις. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται συνοπτικά, σύγκριση των μεθόδων laser και ηλώσεων.

Το Νοέμβριο του 2000 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη γραμμή παραγωγής, σφαιρικού τμήματος ατράκτου, αεροσκάφους A318 συγκόλληση με laser, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.

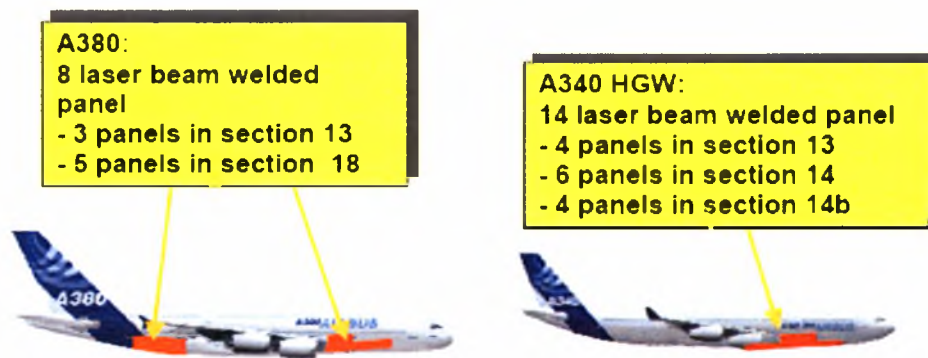
Η συγκόλληση με laser εφαρμόστηκε, όπως προκύπτει από το σχήμα 2.5, και σε τμήματα αεροσκαφών τύπου A380 και A340HGW.



Σχήμα 2.3: Εφαρμογές συγκολλήσεων στην αεροναυπηγική.



Σχήμα 2.4: Εφαρμογές συγκολλήσεων στην αεροναυπηγική.



Σχήμα 2.5: Εφαρμογές συγκολλήσεων στην αεροναυπηγική.

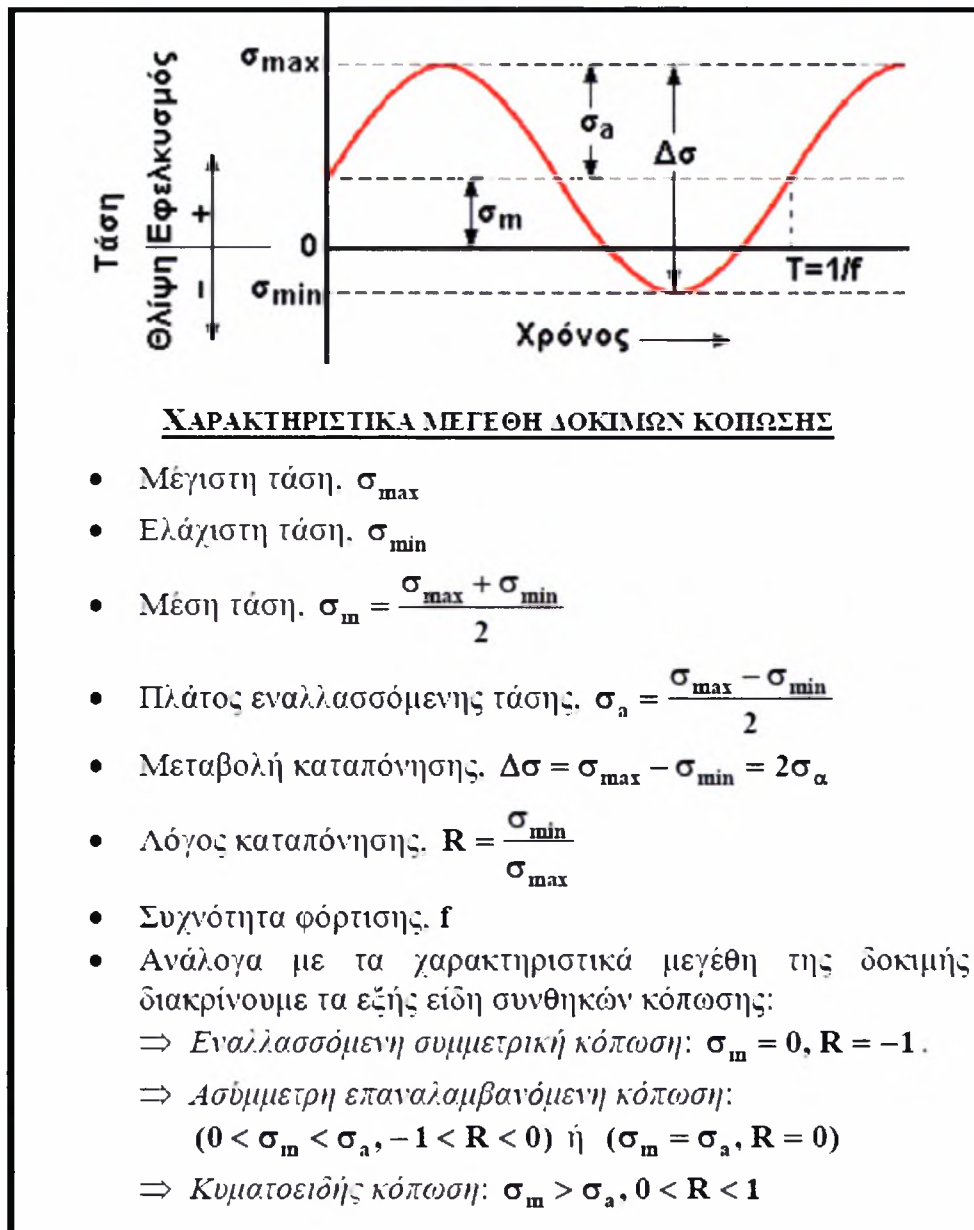
2.5 Κόπωση

Η κόπωση (fatigue) είναι φαινόμενο αστοχίας ενός υλικού που οφείλεται σε επαναλαμβανόμενη επιβολή τάσεων ή παραμορφώσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η κόπωση έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά στην φόρτιση, η οποία είναι κυκλική, δηλαδή το υλικό υποβάλλεται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μιας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η «βλάβη», που προκαλείται στο υλικό. Η βλάβη είναι ένας γενικός όρος που μπορεί να αντιστοιχεί σε τοπική πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό μικρορωγμών, καθώς και σχηματισμό και διάδοση μιας κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την τοπική, προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται συνήθως από την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Η τελική, γρήγορη θραύση επέρχεται όταν η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, έτσι ώστε να ικανοποιείται η κρίσιμη συνθήκη θραύσεως.

Έτσι ενώ στη στατική φόρτιση η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται με αύξηση της τάσεως, στην κόπωση η συνθήκη ικανοποιείται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Ενώ στην στατική φόρτιση η αστοχία από θραύση είναι ακαριαία, στην κόπωση η αστοχία απαιτεί χρόνο, έως ότου η ρωγμή αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος. Έτσι στην κόπωση μιλάμε για διάρκεια ζωής του υλικού. Την διάρκεια ζωής την μετράμε σε κύκλους φορτίσεως και την συμβολίζουμε με N_f . [2]

Στην πειραματική δοκιμή η μεταβολή επιβαλλόμενων τάσεων ή παραμορφώσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι συνήθως ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου, βάσει της

οποίας προκύπτουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής κόπωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής κόπωσης

Για την εκτέλεση της δοκιμής κόπωσης αρχικά επιλέγεται η τιμή της μέσης τάσης σ_m (συνήθως είναι $\sigma_m = 0$), η οποία διατηρείται σταθερή. Στη συνέχεια επιβάλλεται στο δοκίμιο ένα πλάτος σ_a της εναλλασσόμενης τάσης και καταγράφεται το πλήθος N των απαιτούμενων κύκλων φόρτισης για να αστοχήσει το δοκίμιο. Επαναλαμβάνεται η ανωτέρω διαδικασία για νέες τιμές σ_a και για ικανό αριθμό δοκιμίων, οπότε λαμβάνεται μεγάλος αριθμός ζευγών (σ_a, N) και χαράσσεται η αντίστοιχη καμπύλη. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη Wohler ή καμπύλη S-N. [8]

Κεφάλαιο 3. Πειραματική διαδικασία

3.1 Υλικά

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας μελετήθηκαν τα εξής υλικά : το 2139 – T3, το 2139 – T8 και το 6156 – T4. Το κράμα αλουμινίου 2139 περιέχει Al – Cu – Mg – Ag, ενώ το κράμα αλουμινίου 6156 περιέχει Si, Cu, Mn και Mg. Στους πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζεται η χημική ανάλυση των κραμάτων 2139 και 6156 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 2139.

Στοιχείο	Si	Fe	Cu	Mn	Ag	Mg	Zn	Ti	Zr
Περιεκτικότητα % κ.β.	0.04	0.06	4.79	0.3	0.34	0.45	<0.01	0.05	0.01

Πίνακας 3.2: Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 6156.

Στοιχείο	Si	Cu	Mn	Mg
Περιεκτικότητα % κ.β.	1.0	0.90	0.60	0.90

Τα υλικά αυτά συγκολλήθηκαν με Nd: YAG laser. Οι παράμετροι συγκόλλησης των δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3. Στη συνέχεια υπεβλήθησαν σε δοκιμές κόπωσης. Ορισμένα δοκίμια υπεβλήθησαν σε δοκιμές κόπωσης έπειτα από έκθεσή τους σε δοκιμή αλατονέφωσης. Οι δοκιμές κόπωσης και αλατονέφωσης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Πίνακας 3.3: Παράμετροι συγκόλλησης με Nd:YAG laser.

Ισχύς	3000W
Ταχύτητα	1.8 m/min
Σημείο εστίασης	0 (d=0.4 mm)
Συγκολλητικό υλικό	4047, Ø 1.2, 2.5 m/min
Αέριο προστασίας	He 25 l/min (πρόσωπο)
	Ar 15 l/min (ρίζα)

Στην περίπτωση της αλατονέφωσης τα εξεταζόμενα υλικά εκτίθενται σε ένα επιθετικό περιβάλλον που δημιουργείται μέσα σε ένα κλειστό θάλαμο και επιδρά πολύ γρηγορότερα. Η συσκευή αλατονέφωσης αποτελείται από τρία βασικά τμήματα

- a) Το θάλαμο στον οποίο τοποθετούνται τα προς εξέταση υλικά (θάλαμος πειραμάτων).
- b) Το σύστημα αποθήκευσης, τροφοδοσίας και εκνέφωσης του διαβρωτικού μέσου.
- c) Το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των συνθηκών μέσα στον θάλαμο πειραμάτων.

Τα συστήματα b) και c) αποτελούν τα συστήματα υποστήριξης του θαλάμου πειραμάτων.

Ο θάλαμος πειραμάτων είναι εφοδιασμένος με :

- Κατάλληλα στηρίγματα για την τοποθέτηση των δοκιμίων.
- Μία οπή στον πυθμένα από την οποία γίνεται η εκκένωση του νερού που συσσωρεύεται από την υγροποίηση των υδρατμών και τη συνένωση σταγονιδίων του διαβρωτικού μέσου κατά τη λειτουργία του.
- Μία οπή εξόδου του αέρα που χρησιμοποιείται για την εκνέφωση του διαβρωτικού μέσου, ώστε η πίεση μέσα στο θάλαμο να είναι ίδια με την ατμοσφαιρική.
- Κατάλληλη διάταξη για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του.

Το σύστημα αποθήκευσης, τροφοδοσίας και εκνέφωσης του διαβρωτικού μέσου περιλαμβάνει κατ' αρχήν κατάλληλη δεξαμενή στο κάτω μέρος της συσκευής όπου είναι αποθηκευμένο το διαβρωτικό μέσο (διάλυμα NaCl). Από τη δεξαμενή αυτή το διαβρωτικό μέσο οδηγείται σε κατάλληλο ακροφύσιο τοποθετημένο μέσα στο θάλαμο των πειραμάτων μαζί με υγρό αέρα που προέρχεται από τον υγροποιητή. Στον υγροποιητή παρέχεται ρεύμα αέρα υπό πίεση από εξωτερικό αεροσυμπιεστή. Καθώς αυτό το ρεύμα διέρχεται από τη συγκεκριμένη διάταξη, περνά μέσα από μια στήλη νερού ορισμένης θερμοκρασίας, οπότε θερμαίνεται στη θερμοκρασία του νερού και καθίσταται κορεσμένο σε υγρασία. Ο υγρός αέρας που παράγεται με τον τρόπο αυτό οδηγείται στο θάλαμο πειραμάτων μαζί με το διαβρωτικό μέσο μέσα από το ακροφύσιο που αναφέρθηκε προηγουμένα, οπότε αναμιγνύονται με αποτέλεσμα τελικά να δημιουργείται μία “ομίχλη” στο χώρο όπου βρίσκονται τα δοκίμια. Η ομίχλη αυτή συνιστά το κατ' εξοχήν διαβρωτικό μέσο, από την άποψη ότι αυτή έρχεται σε άμεση επαφή με τα δοκίμια. Η θερμοκρασία της ρυθμίζεται από τη θερμοκρασία του υγρού αέρα που παράγει ο υγροποιητής.

Το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των συνθηκών μέσα στο θάλαμο πειραμάτων αποτελείται από έναν υπολογιστή και ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων που βρίσκεται κυρίως μέσα στο θάλαμο πειραμάτων. Ο υπολογιστής καταγράφει τις ενδείξεις των αισθητήρων και τις συγκρίνει με κάποιες προδιαγεγραμμένες τιμές. Αν κάποιες ενδείξεις αποκλίνουν από τις

αντίστοιχες προδιαγραφές ο υπολογιστής ενεργοποιεί κατάλληλες ηλεκτρομηχανικές / ηλεκτρικές / ηλεκτρονικές διατάξεις που αποκαθιστούν τις επιθυμητές συνθήκες.

Τα δοκίμια της κόπωσης που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 (2139 – T3), στον πίνακα 3.5 (2139 – T8) και στον πίνακα 3.6 (6156 – T4). Στη στήλη σ_{max} είναι οι τιμές της μέγιστης τάσης που δέχτηκε κάθε δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης και στη στήλη N_f παρουσιάζεται ο αριθμός των κύκλων της δοκιμής κόπωσης, μετά το πέρας των οποίων το κάθε δοκίμιο υπαίσκει θραύση. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης, περιελάμβανε

1. μελέτη των επιφανειών θραύσης με στερεοσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία, και στη συνέχεια
2. μεταλλογραφία σε επιλεγμένες εγκάρσιες τομές ώστε να χαρακτηριστεί το σημείο έναρξης της κόπωσης και να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά της διαδρομής των ρωγμών κόπωσης στα δείγματα.

Για κάθε κατηγορία δειγμάτων προσδιορίστηκε το σημείο έναρξης καθώς και η όδευση της ρωγμής κόπωσης, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας θραύσης και συσχετίστηκαν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της μικροδομής των κραμάτων.

Πίνακας 3.4: Συνθήκες δοκιμής κόπωσης για το κράμα 2139 - T3.

A/A	$\sigma_{max}(Mpa)$	R	N_f (κύκλοι)
ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ			
6	125	0.1	8.111.057,50
24	125	0.1	875.491,50
7	150	0.1	1.288.705
8	150	0.1	1.025.613,50
ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗ 30 ημέρες			
1	50	0.1	10.010.000
2	65	0.1	10.248.000
3	75	0.1	857.628
3A	75	0.1	4.510.799
4	100	0.1	344.410
23	125	0.1	169.660
5	150	0.1	78.446

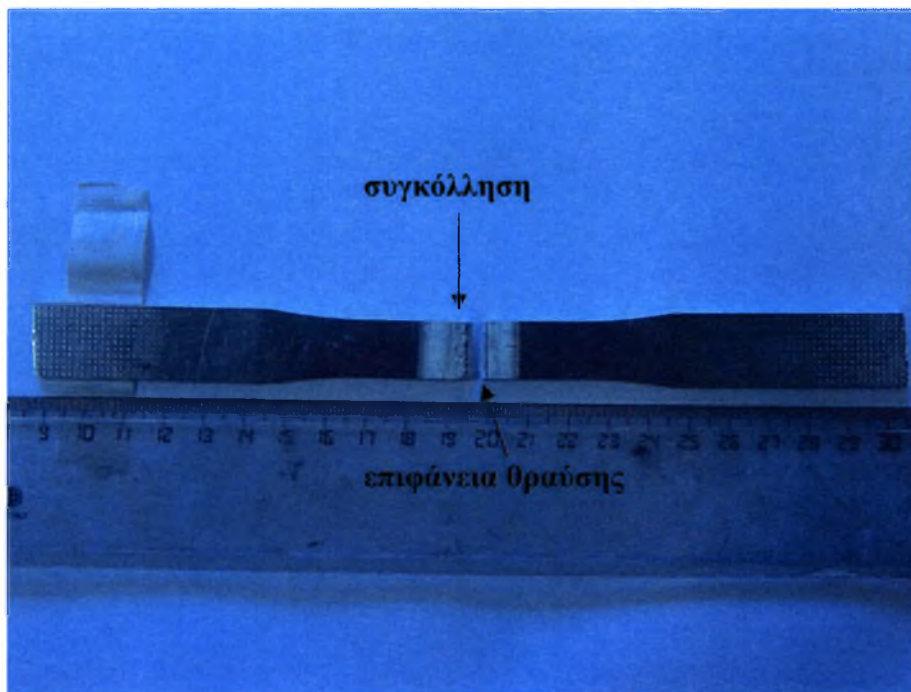
Πίνακας 3.5: Συνθήκες δοκιμής κόπωσης για το κράμα 2139 - T8

A/A	$\sigma_{\max}(\text{Μpa})$	R	$N_f(\text{κύκλοι})$
ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ			
26	125	0.1	3.052.866
13	150	0.1	1.541.637
14	150	0.1	875.546
15	150	0.1	1.020.939,50
ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗ 30 ημέρες			
9	75	0.1	182.304
10	100	0.1	360.266
11	125	0.1	178.307
25	125	0.1	200.000
12	150	0.1	115.779

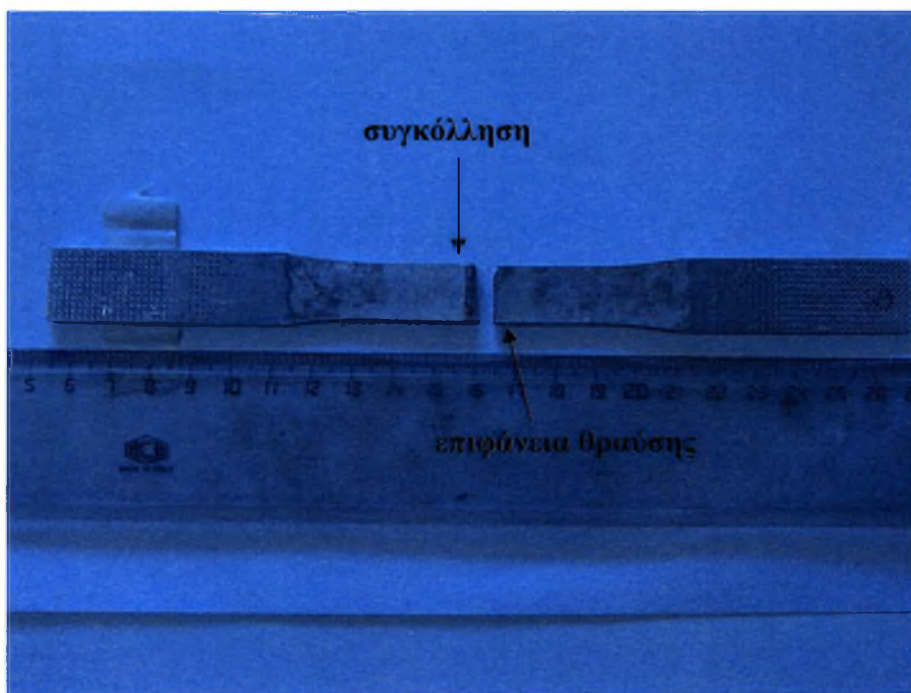
Πίνακας 3.6: Συνθήκες δοκιμής κόπωσης για το κράμα 6156 - T4.

A/A	$\sigma_{\max}(\text{Μpa})$	R	$N_f(\text{κύκλοι})$
ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ			
28	125	0.1	1.222.868,50
20	150	0.1	162.232
21	150	0.1	385.769
22	150	0.1	580.917
ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗ 30 ημέρες			
16	125	0.1	2.808.411
17	125	0.1	2.314.091
18	125	0.1	480.000
19	150	0.1	109.272
27	150	0.1	128.690

Μετά την δοκιμή κόπωσης και αλατονέφωσης τα δοκίμια στάλθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας όπου και αξιολογήθηκαν. Στις εικόνες 3.7 και 3.8 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά ένα αδιάβρωτο και ένα διαβρωμένο δοκίμιο αντίστοιχα.



Σχήμα 3.7: Αδιάβρωτο δοκίμιο του κράματος 2139-T3.



Σχήμα 3.8: Διαβρωμένο δοκίμιο του κράματος 2139-T3.

3.2 Κοπή

Η κοπή των δοκιμίων έγινε με το κοπτικό μηχάνημα Unitom-2 της Struers και στη συνέχεια έγινε εγκιβωτισμός σε ρητίνη Acryfix. Τα δοκίμια λειάνθηκαν διαδοχικά στους δίσκους των 300, 500, 800, 1000, 2400 και 4000 Grid και στη συνέχεια στιλβώθηκαν στο μηχάνημα Dap-V της Struers με διαμαντόπαστα 3 μm και 1 μm . Τέλος υπεβλήθησαν σε χημική προσβολή με το αντιδραστήριο Keller's [2 mL HF (48%), 3 mL HCL (conc), 5 mL HNO_3 (conc), 190 mL H_2O] για περίπου 30 δευτερόλεπτα.

3.3 Μακροσκοπικός και μικροσκοπικός έλεγχος

Στη συνέχεια έχουμε παρατήρηση του προσώπου και της ρίζας της συγκόλλησης με τη χρήση στερεοσκοπίου. Γνωρίζουμε ότι το σημείο έναρξης της ρωγμής κόπωσης συμπίπτει με το κέντρο του τόξου. Σύμφωνα με αυτό, από τις φωτογραφίες του στερεοσκοπίου γνωρίζουμε ακριβώς πιο σημείο χρειάζεται να ελέγξουμε στο μικροσκόπιο.

Ο μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος έγινε με το οπτικό μικροσκόπιο Leitz Wild GMBH.

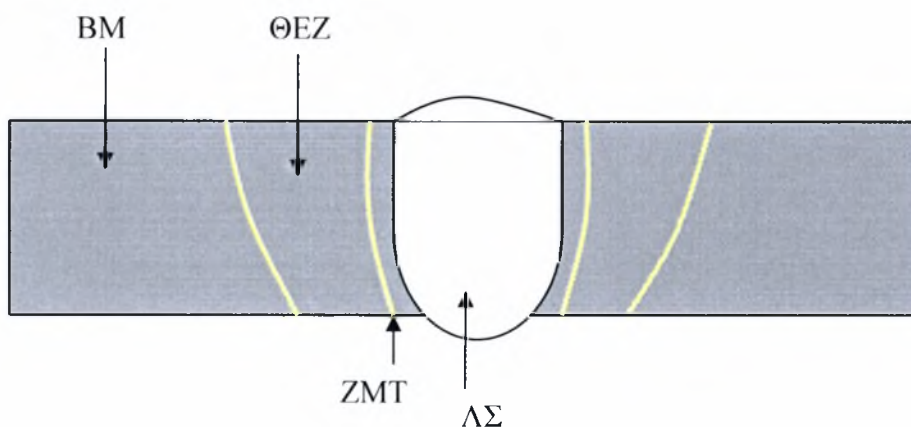
3.4 Μικροσκληρομέτρηση

Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων έγινε με σκοπό τον έλεγχο της μεταβολής της σκληρότητας των δοκιμίων σε εγκάρσια τομή, από το κέντρο της συγκόλλησης έως το μέταλλο βάσης. Η μικροσκληρομέτρηση έγινε με φορτίο 200 gr ($\text{HV}_{0.2}$) και χρόνο μέτρησης 15 δευτερόλεπτα. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν από το μέσο της λίμνης συγκόλλησης και συνέχιζαν ανά 500 μm έως το μέταλλο βάσης.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα – Συζήτηση Αποτελεσμάτων

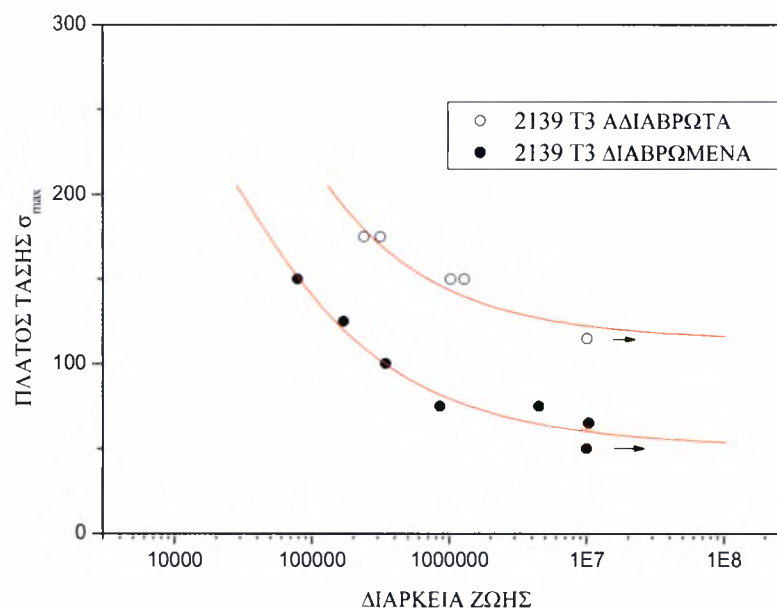
4.1 Κράμα 2139-T3

Η μικροδομή όπως σχηματικά φαίνεται και στο σχήμα 4.1 αποτελείται από το μέταλλο συγκόλλησης (ΛΣ), τη ζώνη μερικής τήξης (ZMT), τη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) καθώς και το μέταλλο βάσης (BM). Η ζώνη μερικής τήξης (ZMT) των συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου είναι μια σημαντική περιοχή και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή η ZMT σε αυτά τα υλικά επηρεάζεται σημαντικά από τις παραμέτρους ένωσης. Οι αλλαγές μικροδομής της ZMT σχετίζονται όχι μόνο με την εισαγωγή και τις τεχνικές θερμότητας συγκόλλησης, αλλά εξαρτώνται και από την αρχική θερμική ιστορία του κράματος.



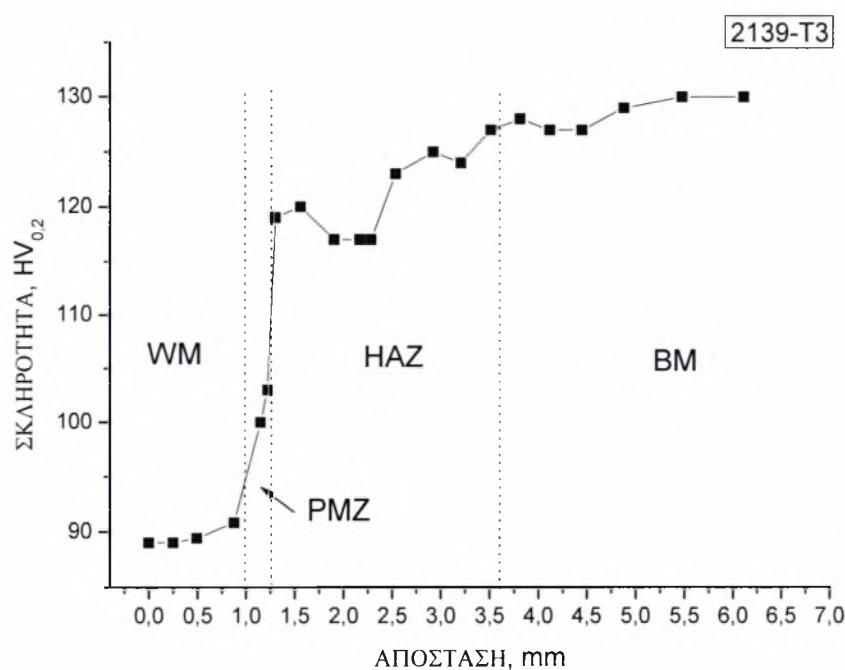
Σχήμα 4.1 : Η μικροδομή ενός μετάλλου συγκόλλησης.

Στο διάγραμμα 4.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες Wheeler του κράματος 2139 – T3. Το όριο διαρκούς αντοχής στα μη διαβρωμένα είναι 115 MPa, ενώ στα διαβρωμένα 60 MPa. Επομένως στα διαβρωμένα είναι μειωμένο κατά 55MPa.



Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες Wheeler του κράματος 2139-T3.

Στο διάγραμμα 4.3 παρουσιάζεται το προφίλ μικροσκληρομέτρησης που έγινε στο κράμα 2139-T3. Παρατηρούμε μεταβολές των τιμών όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της συγκόλλησης. Η σκληρότητα στην λίμνη συγκόλλησης είναι 90 HV, στην ζώνη μερικής τήξης 105 HV, στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη 120 HV και στο βασικό μέταλλο 130 HV.

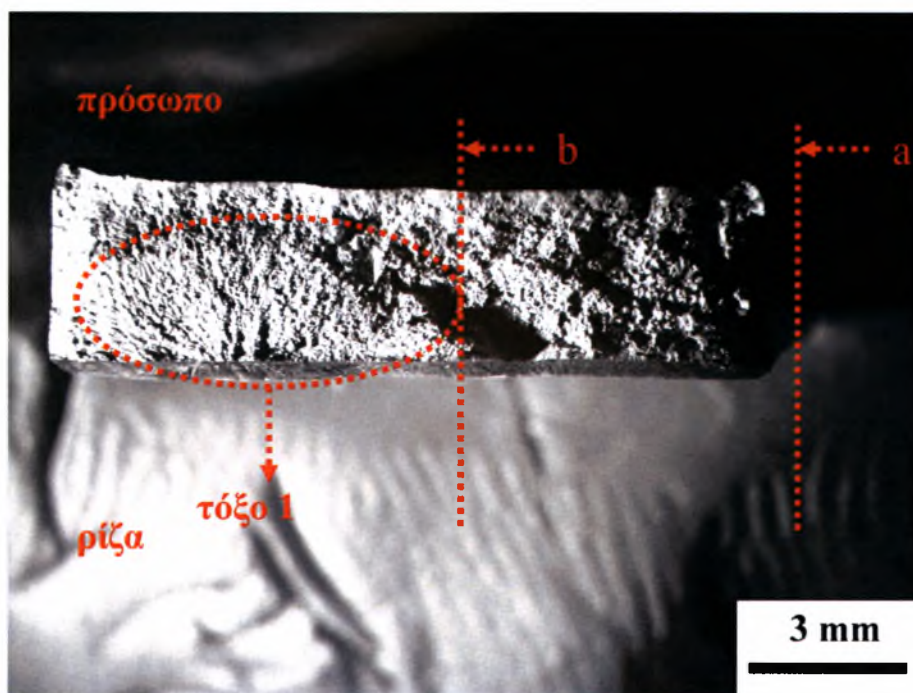


Διάγραμμα 4.3: Προφίλ μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 2139-T3.

4.1.1 Αδιάβρωτα δοκίμια

Για την μελέτη του υλικού 2139 – T3 χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά αδιάβρωτα δοκίμια. Τα δοκίμια αυτά είναι το 6, το 8 και το 8, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.4. Και στα τρία αυτά δοκίμια έγινε η κατάλληλη προετοιμασία για την μελέτη τους στο στερεοσκόπιο και στο μικροσκόπιο. Η θέση θραύσης όλων των δοκιμίων ήταν στην περιοχή της συγκόλλησης. Είναι γνωστό ότι τα κέντρα των τόξων που εμφανίζονται στην επιφάνεια θραύσης είναι σημεία έναρξης ρωγμών. Για το λόγο αυτό μελετήσαμε στο στερεοσκόπιο τις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων.

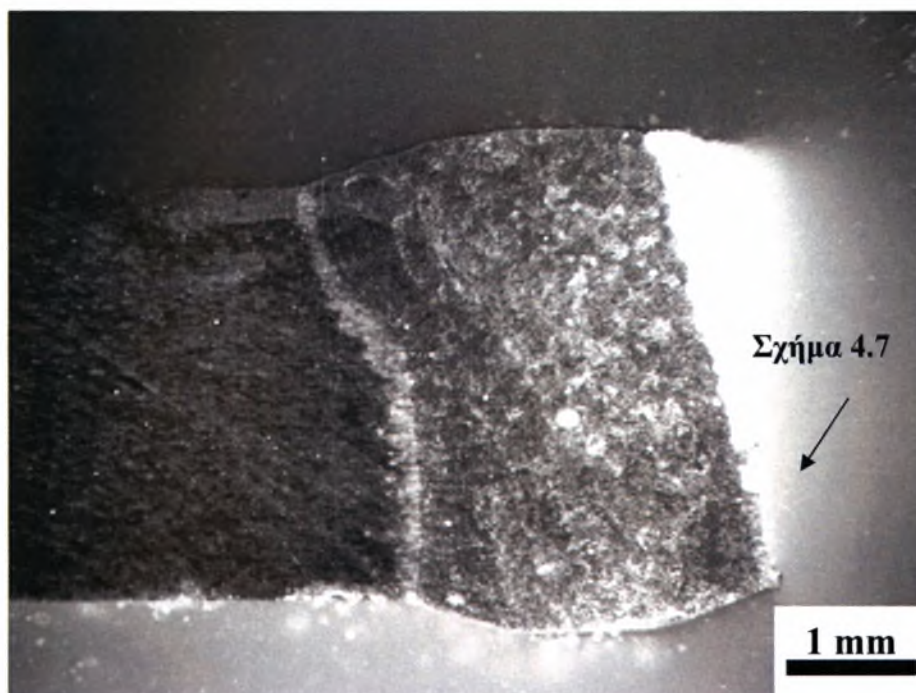
Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 6 υπάρχει ένα τόξο ύψους 2mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 6 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4, ακριβώς στο κέντρο της περιοχής κόπωσης.



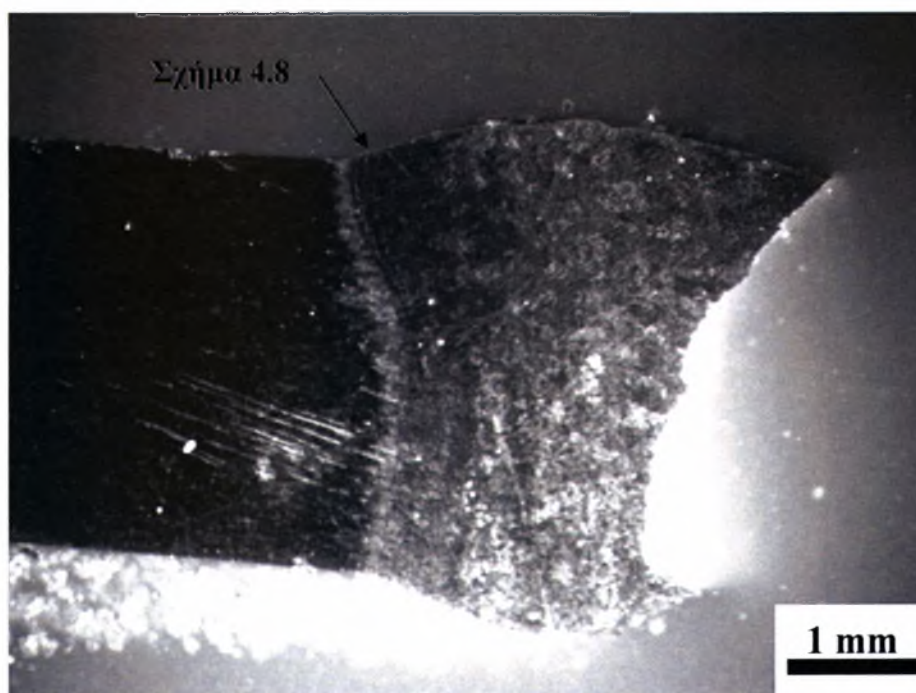
Σχήμα 4.4: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 6 ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).

Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.5 και 4.6 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 6, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου

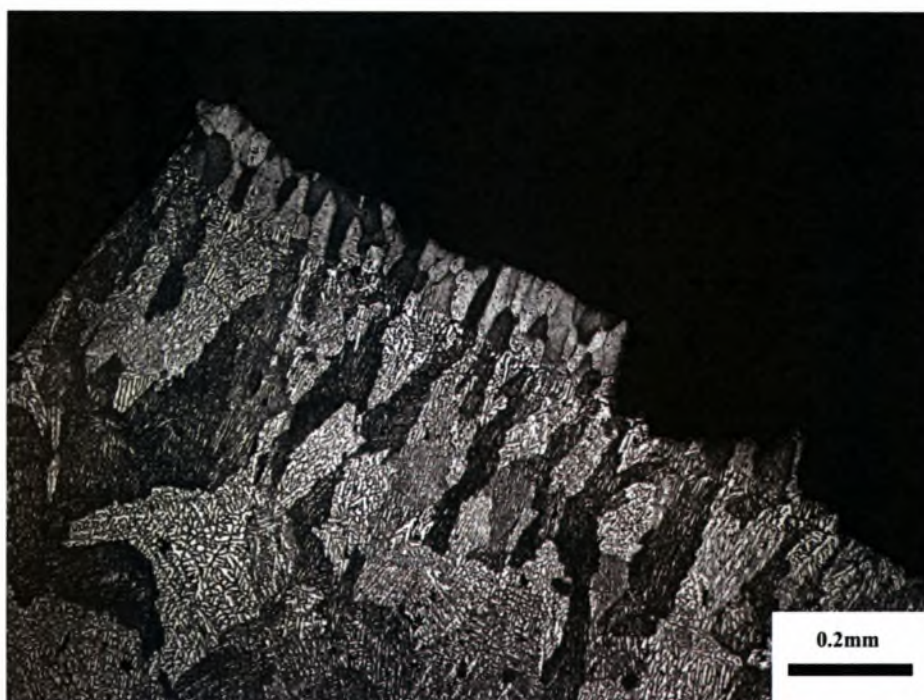
συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7. Η ενίσχυση είτε στο πρόσωπο είτε στη ρίζα φαίνεται ότι παίζει καθοριστικό ρόλο για την έναρξη της ρωγμής κόπωσης στη συγκεκριμένη περιοχή του δοκιμίου λόγω της ύπαρξης εγχοπής στην ενίσχυση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.



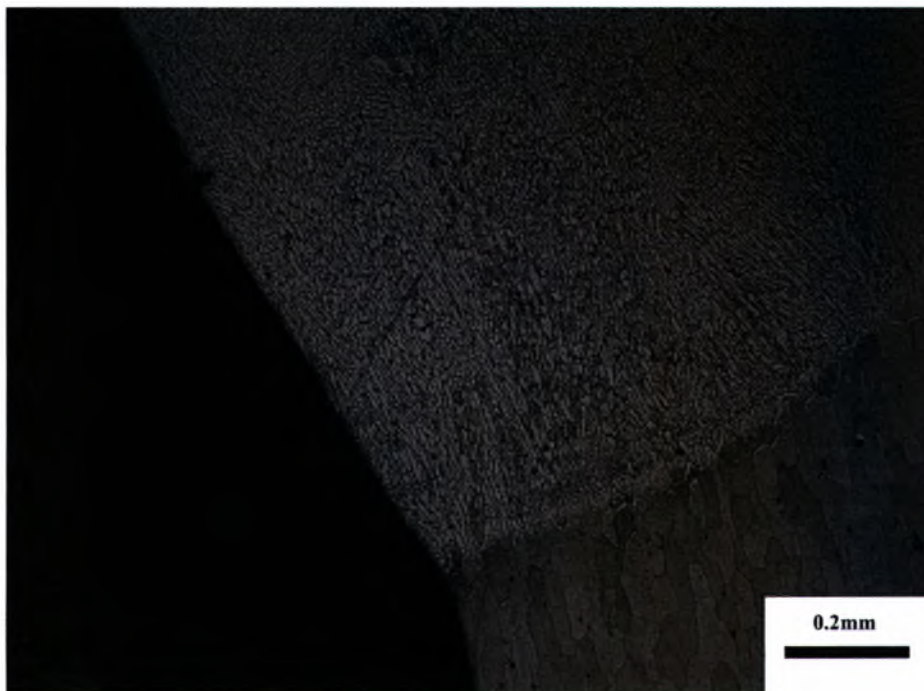
Σχήμα 4.5: Μακρογραφία δοκιμίου 6a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).



Σχήμα 4.6: Μακρογραφία δοκιμίου 6b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).

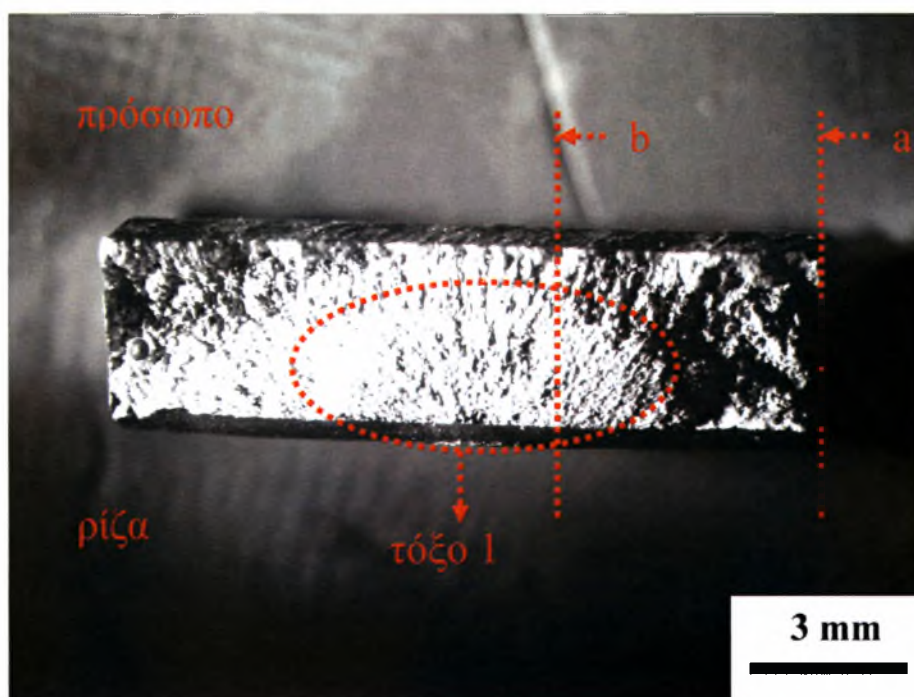


Σχήμα 4.7: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 6a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).



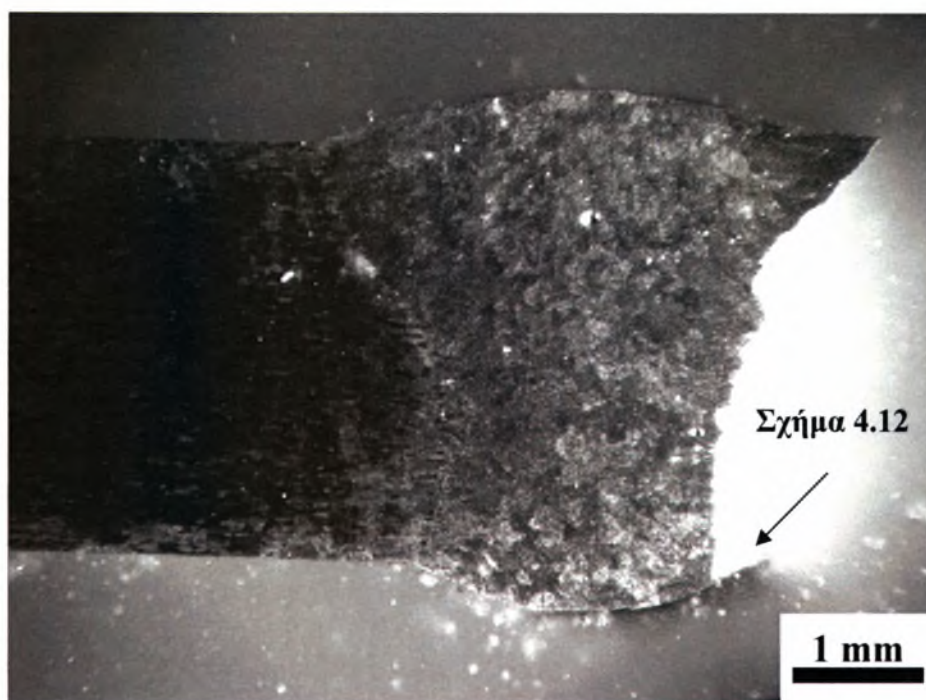
Σχήμα 4.8: Εγκοπή στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 6b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 8.111.057,50$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 7 υπάρχει ένα τόξο ύψους 2.57mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 7 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9, ακριβώς στο κέντρο της περιοχής κόπωσης.

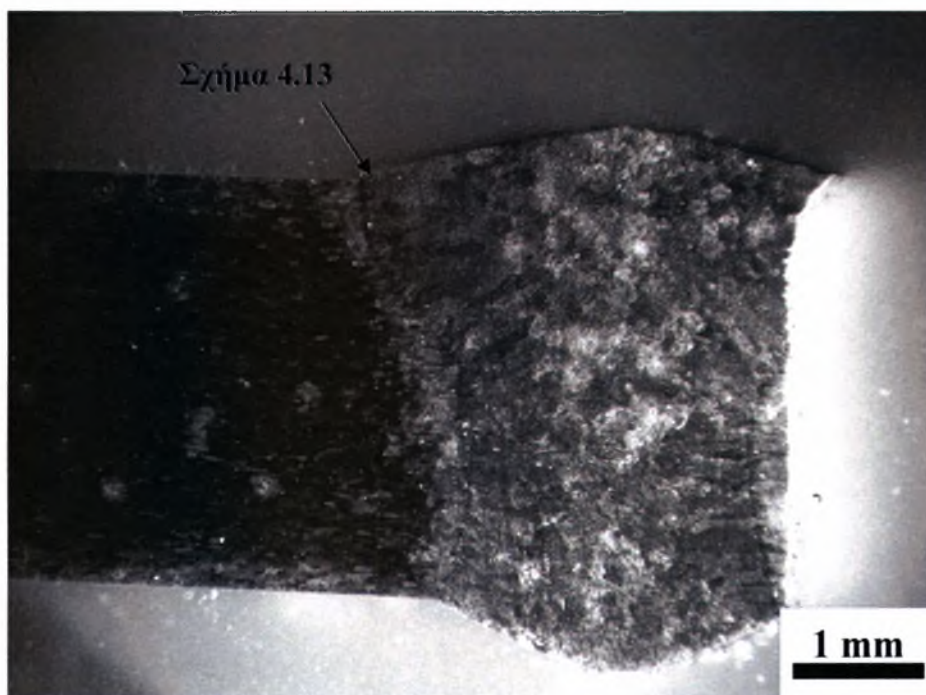


Σχήμα 4.9: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 7 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$).

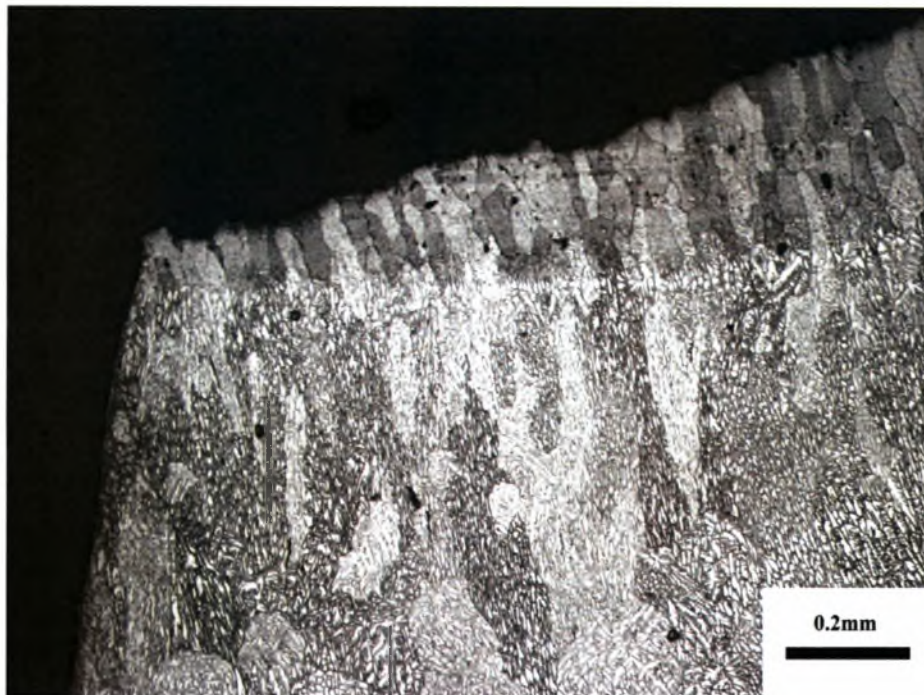
Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.10 και 4.11 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 7, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.12. Όπως διαπιστώνεται και από το σχήμα 4.13 δεν εμφανίστηκαν πουθενά αλλού ρωγμές κόπωσης.



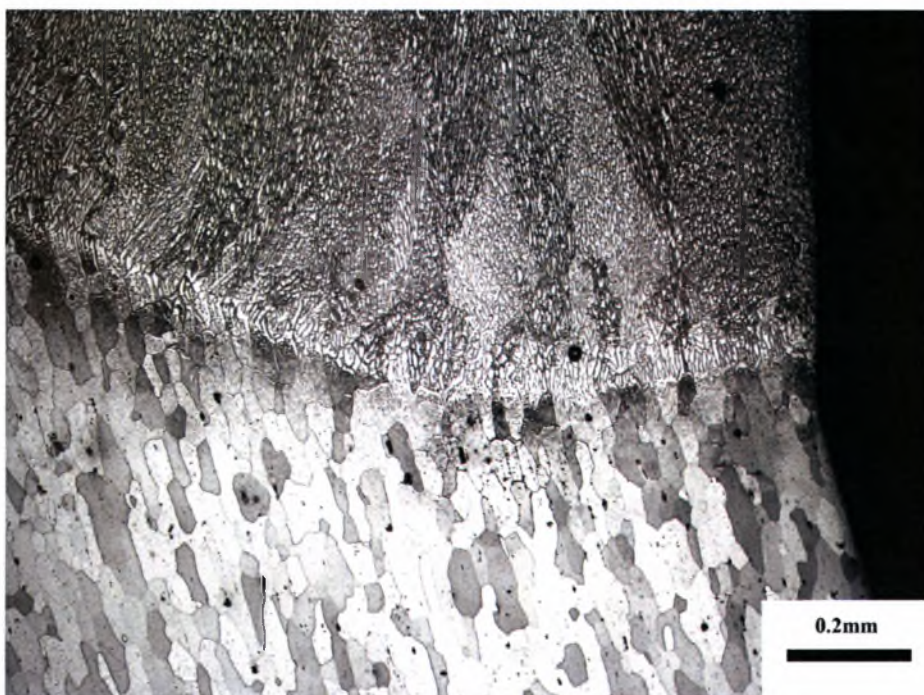
Σχήμα 4.10: Μακρογραφία δοκιμίου 7a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$).



Σχήμα 4.11: Μακρογραφία δοκιμίου 7a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$).

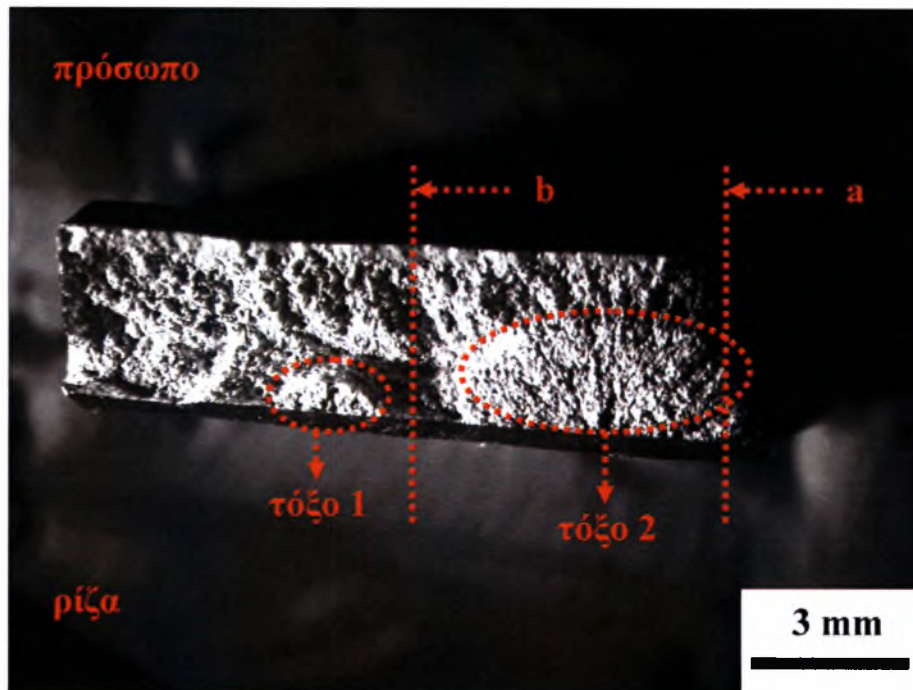


Σχήμα 4.12: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 7a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$).



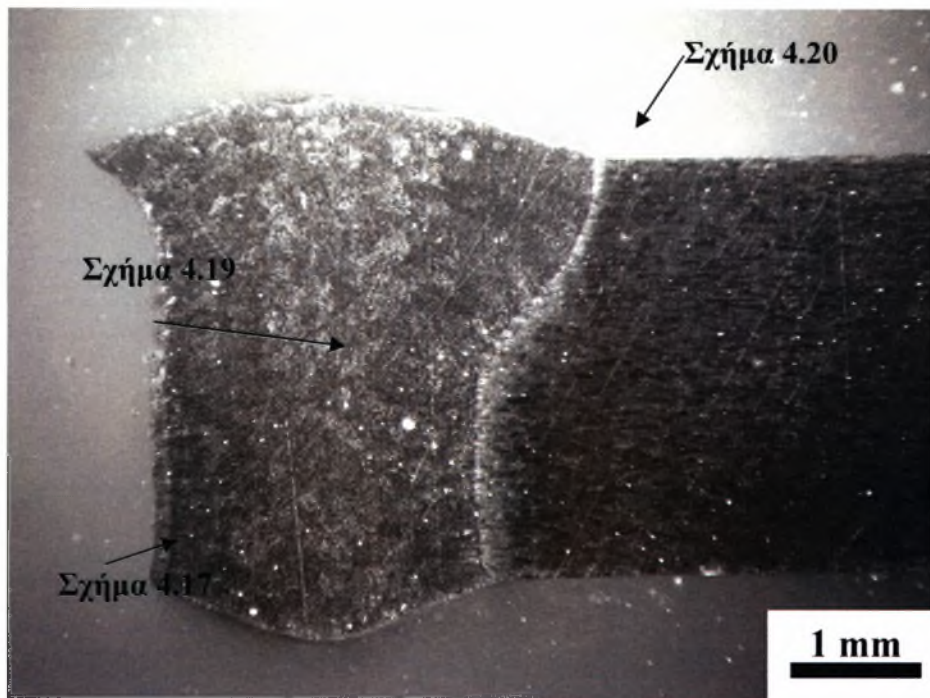
Σχήμα 4.13: Δεν εμφανίζονται άλλες ρωγμές κόπωσης στο δοκίμιο 7b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.288.705$)

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 8 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο τόξο έχει ύψος 0.7mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 2.1mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 8 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14.

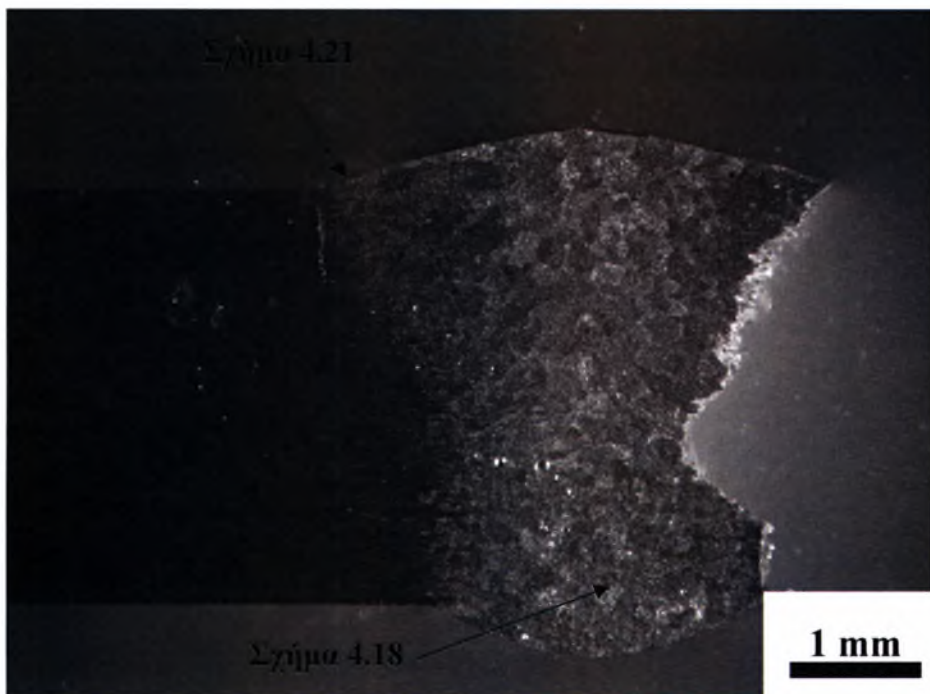


Σχήμα 4.14: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 8 ($\sigma_{max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).

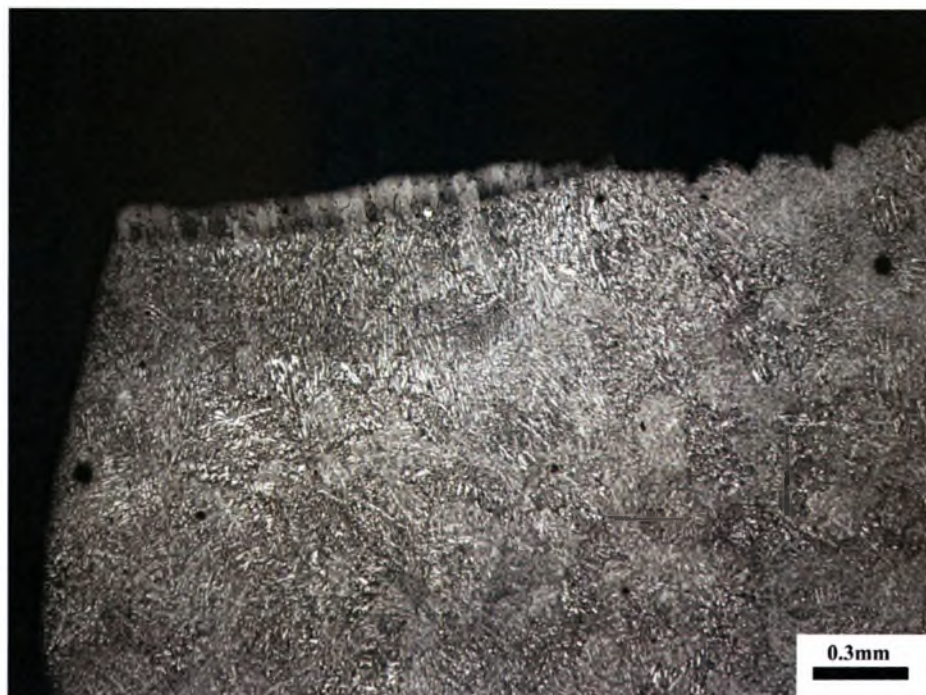
Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 8, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.17. Όπως φαίνεται και από τα σχήματα 4.18 και 4.19 υπάρχουν αρκετοί πόροι τόσο στη ρίζα όσο και στο κέντρο της συγκόλλησης. Εκτός από την κύρια ρωγμή που οδήγησε το δοκίμιο σε αστοχία εντοπίστηκαν και δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης που αναπτύσσονται παράλληλα ακριβώς στην ίδια περιοχή. Οι ρωγμές αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 4.20 και 4.21.



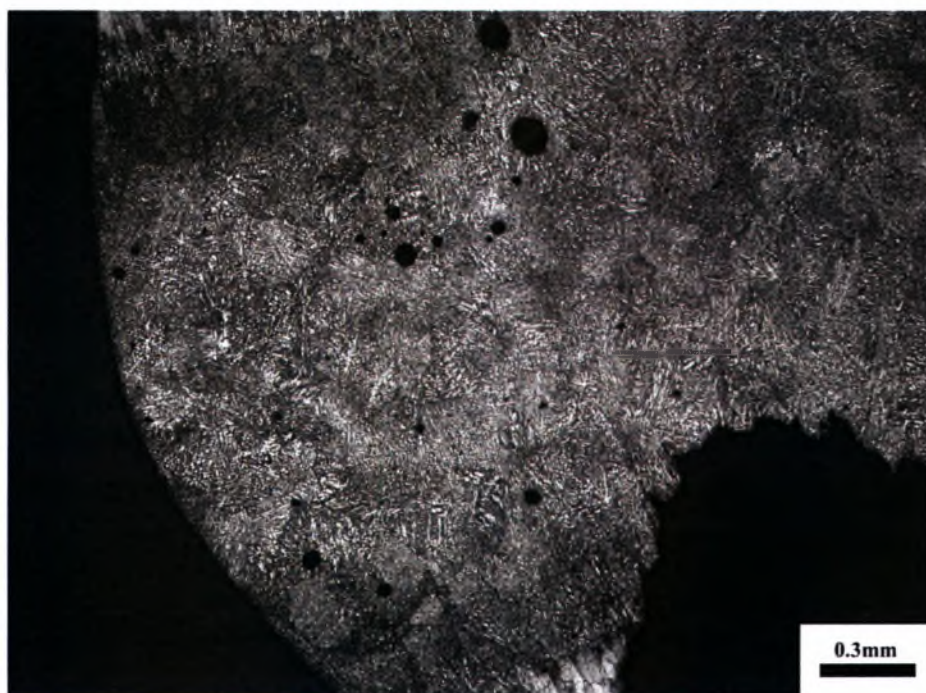
Σχήμα 4.15: Μακρογραφία δοκιμίου 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).



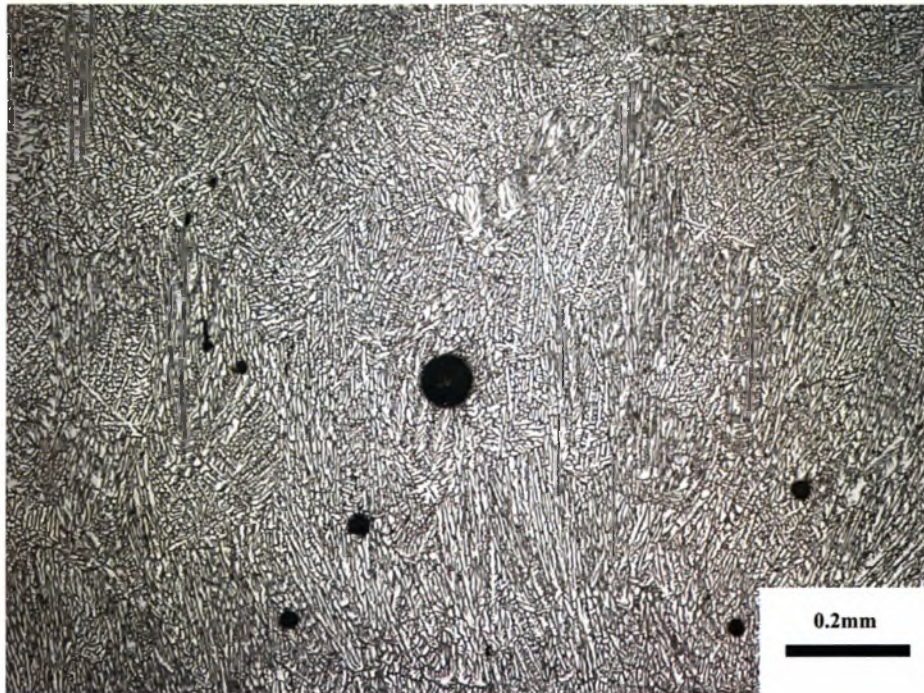
Σχήμα 4.16: Μακρογραφία δοκιμίου 8b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).



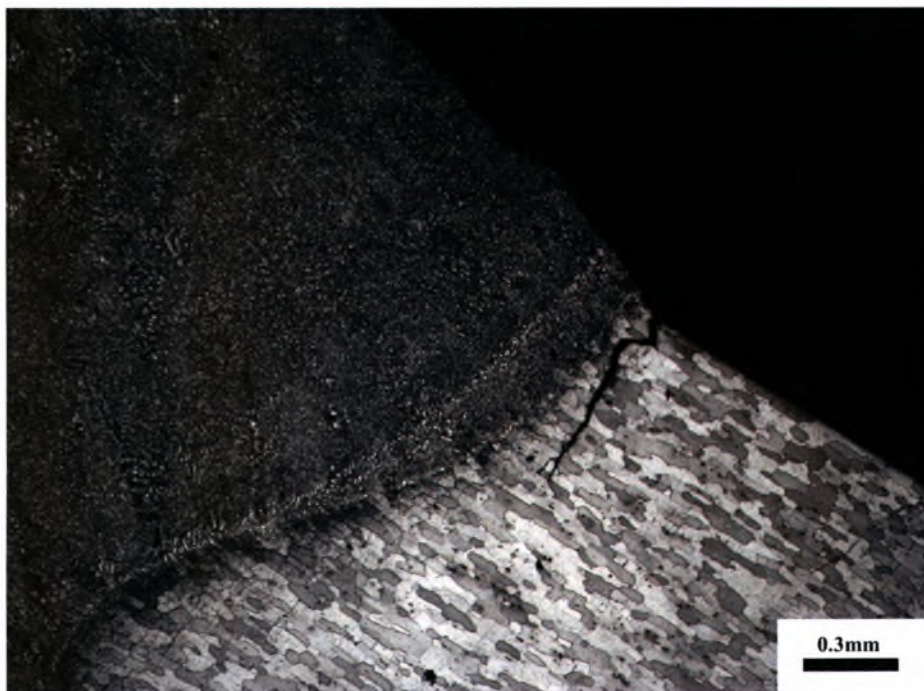
Σχήμα 4.17: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).



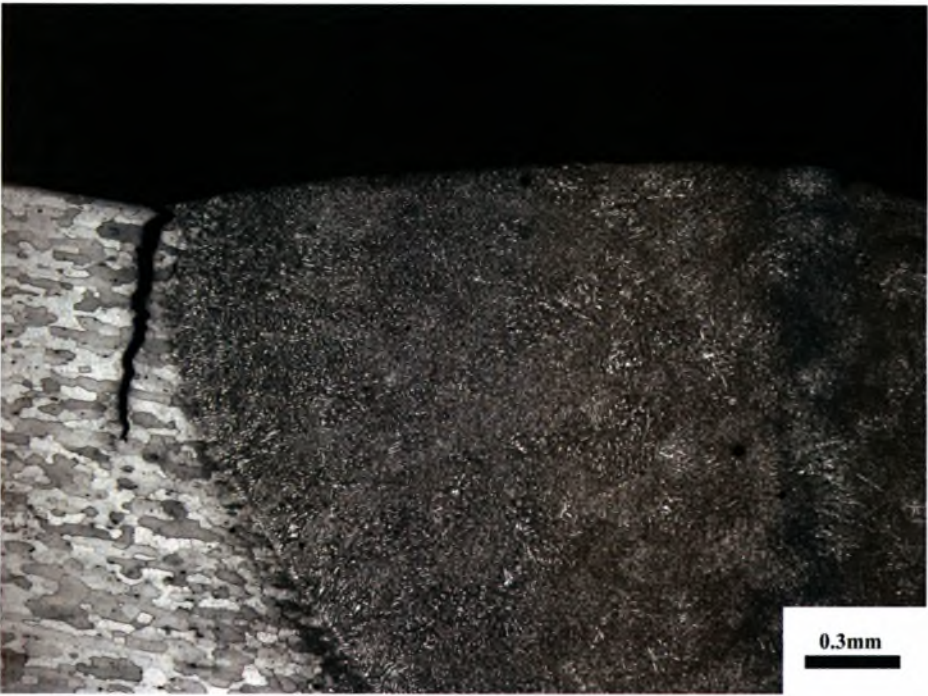
Σχήμα 4.18: Πόροι στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 8b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).



Σχήμα 4.19: Πόροι στο κέντρο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).



Σχήμα 4.20: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 8a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).



Σχήμα 4.21: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 8b ($\sigma_{max} = 150$, $N_f = 1.025.613,50$).

Συνολικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης, όπως τα ύψη των τόξων, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.22 για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά.

Πίνακας 4.22: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης.

2139 – T3 ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ		
Δοκίμιο	Ύψος τόξου 1 (mm)	Ύψος τόξου 2 (mm)
6	2mm	-
7	2.57mm	-
8	0.7mm	2.1mm

Η γωνία της ενίσχυσης μετρήθηκε σύμφωνα με τον τρόπο που προτείνεται από το βιβλίο του Masubuchi. [3] Ο τρόπος αυτός φαίνεται στο σχήμα 4.23. Επίσης μετρήθηκε και το ύψος της ενίσχυσης σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Στον πίνακα 4.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Το ύψος της ενίσχυσης είναι κατά μέσο όρο 0.4 mm τόσο στο πρόσωπο όσο και στη ρίζα ενώ σχηματίζει γωνία περίπου 160° με το μέταλλο βάσης.



Σχήμα 4.23 : Τρόπος μέτρησης της κλίσης ενίσχυσης της συγκόλλησης.

Πίνακας 4.24: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης.

2139 – T3 ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ				
Δοκίμιο	Κλίση ενίσχυσης στην επιφάνεια	Κλίση ενίσχυσης στη ρίζα	Ύψος ενίσχυσης στην επιφάνεια (mm)	Ύψος ενίσχυσης στη ρίζα (mm)
6	160°	180°	0.41	0,32
7	140°	190°	0.47	0.35
8	170°	130°	0.41	0.38

Από τις επιφάνειες θραύσης μπορέσαμε να υπολογίσουμε το σημείο που βρίσκεται το κέντρο των τόξων που οδήγησαν στη θραύση των δοκιμίων. Παρατηρήθηκε ότι οι ρωγμές κόπωσης που αναπτύχθηκαν και οδήγησαν στην αστοχία και στα τρία δοκίμια έχουν σημείο έναρξης στη ZMT (ζώνη μερικής τήξης) στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ.

Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης. Η ενίσχυση είτε στο πρόσωπο είτε στη ρίζα

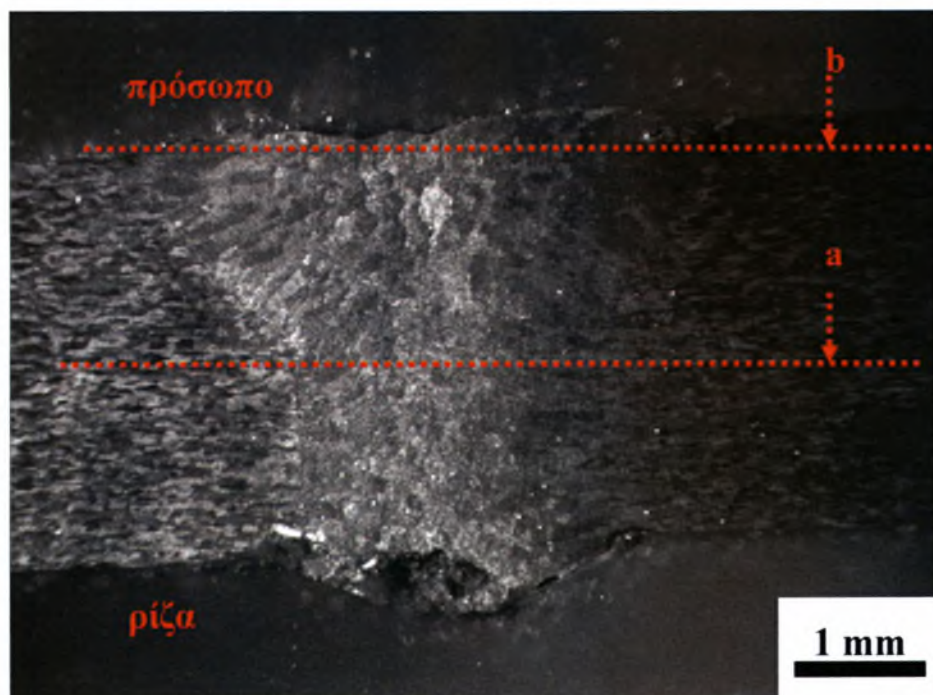
φαίνεται ότι παίζει τον καθοριστικό ρόλο για την έναρξη της ρωγμής κόπωσης στη συγκεκριμένη περιοχή των δοκιμίων λόγω της ύπαρξης εγχοπών στην ενίσχυση.

Εκτός της κύριας ρωγμής που οδηγεί το δοκίμιο σε αστοχία, στους συγκεκριμένους κάθε φορά κύκλους που αναφέρονται στον πίνακα 3.4, εντοπίστηκαν και δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης που αναπτύσσονται παράλληλα ακριβώς στην ίδια περιοχή. Οι δευτερεύουσες αυτές ρωγμές εντοπίστηκαν στα δείγματα με επίπεδο μέγιστης τάσης μεγαλύτερο από 125 MPa.

4.1.2 Δοκίμια που έχουν υποστεί αλατονέφωση για διάστημα 30 ημερών

Για την ολοκλήρωση της μελέτης του υλικού 2139 –T3 χρησιμοποιήθηκαν άλλα τέσσερα δοκίμια, το 2, το 3, το 4 και το 5. Η διαφορά είναι ότι τα δοκίμια αυτά είναι διαβρωμένα. Ομοίως, στα δοκίμια αυτά, έγινε μια προετοιμασία για την μελέτη τους στο στερεοσκόπιο και στη συνέχεια στο μικροσκόπιο. Η θέση θραύσης όλων των δοκιμίων ήταν στην περιοχή της συγκόλλησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο 2 δεν υπέστη θραύση. Αυτό συνέβη επειδή η τάση που ασκούταν στο δοκίμιο ήταν αρκετά μικρή (65 MPa). Για την καλύτερη μελέτη του δοκιμίου επιλέχθηκε η τομή a – b όπως φαίνεται στο σχήμα 4.25



Σχήμα 4.25: Μακρογραφία του δοκιμίου 2 ($\sigma_{\max} = 65$, $N_f = 10.248.000$).

Παρατηρήθηκε ότι η διάβρωση είναι εντονότερη στο μέταλλο συγκόλλησης, κυρίως στη ρίζα, και γύρω από τη συγκόλληση, ενώ το βασικό μέταλλο είναι καθαρό. Στο σχήμα 4.26 φαίνεται πόσο έντονη είναι η διάβρωση στη ρίζα του δοκιμίου, ενώ στο σχήμα 4.27 παρατηρείται ότι η διάβρωση είναι περικρυσταλλική. Στο πρόσωπο της συγκόλλησης, όπως παρατηρείται στο σχήμα 4.25, δεν υπάρχει ενίσχυση. Αυτό συμβαίνει επειδή είτε δεν υπήρχε εξ αρχής, είτε έχει φύγει λόγω της έντονης διάβρωσης. Ακόμη, σε αυτές τις τομές το δοκίμιο δεν είναι καθόλου πορώδες.

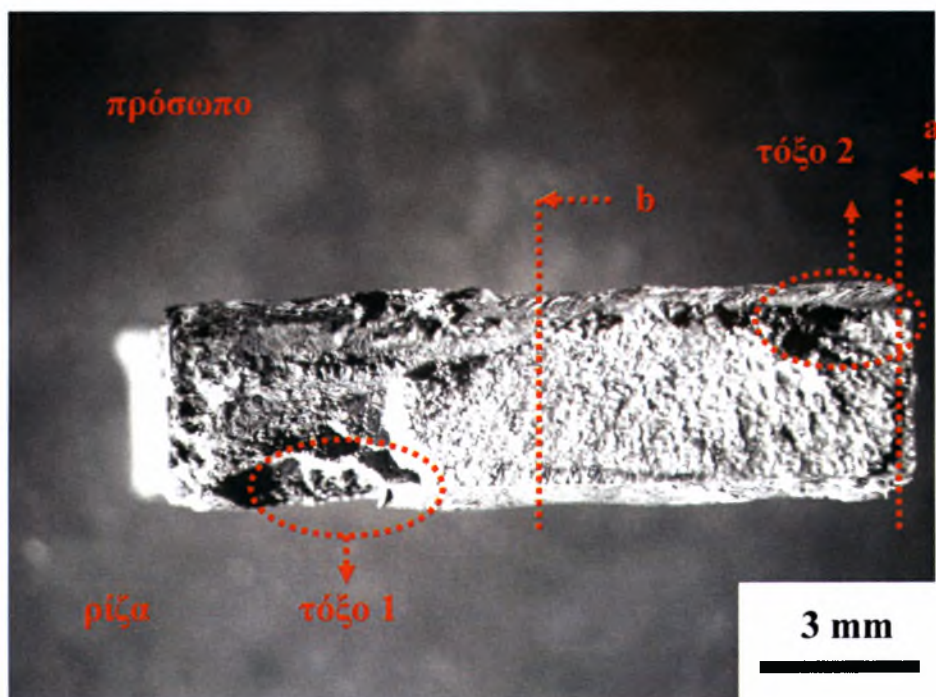


Σχήμα 4.26: Εμφάνιση έντονης διάβρωσης στη ρίζα του δοκιμίου 2 ($\sigma_{\max} = 65$, $N_f = 10.248.000$).



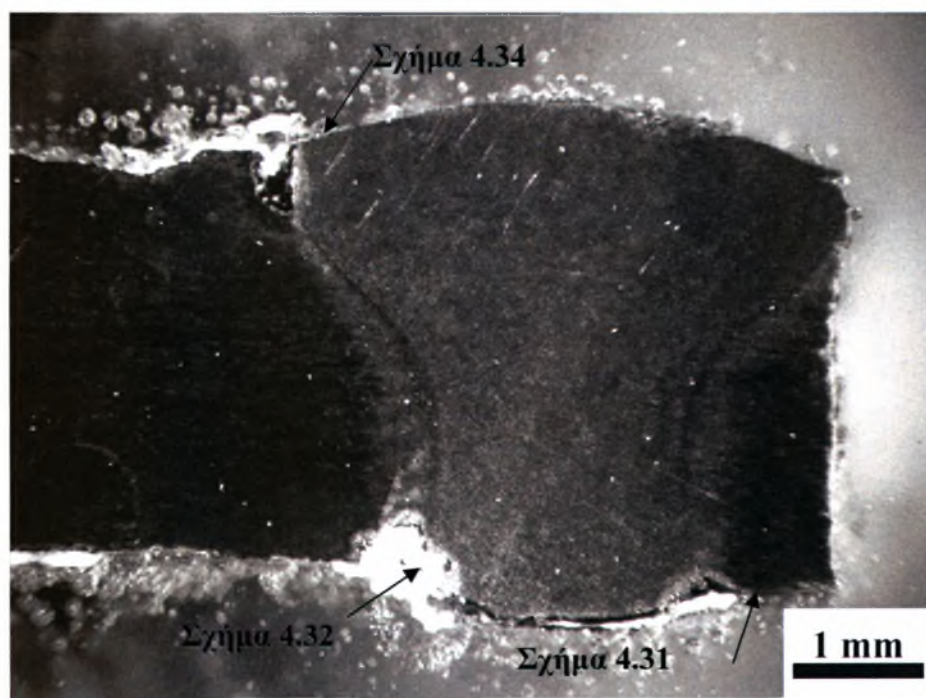
Σχήμα 4.27: Περικρυσταλλική διάβρωση στο δοκίμιο 2 ($\sigma_{\max} = 65$, $N_f = 10.248.000$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 3 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο έχει ύψος 0,85mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 1mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 3 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.28.

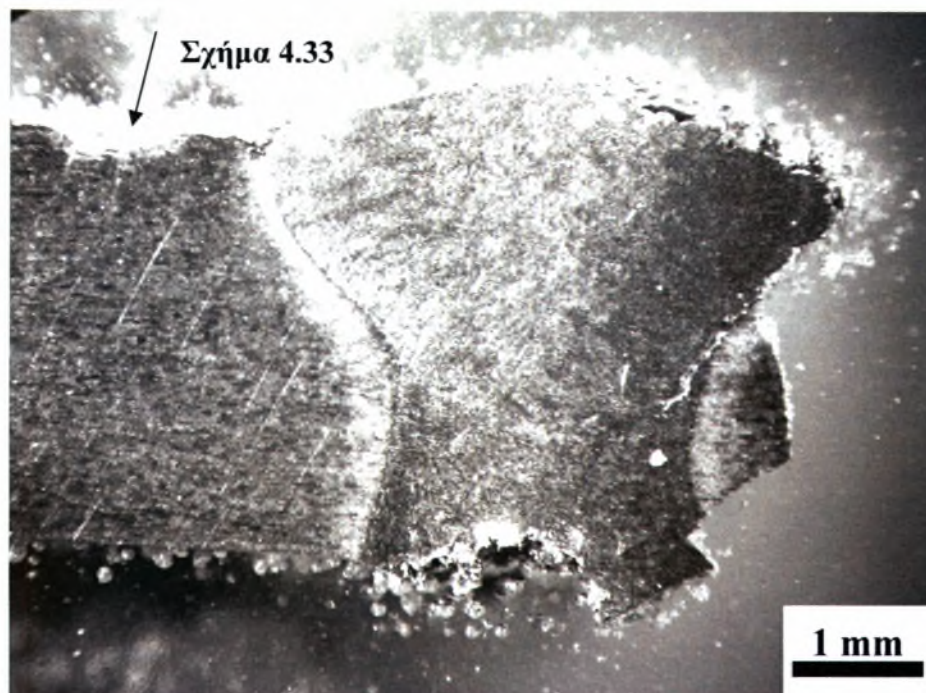


Σχήμα 4.28: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 3 ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).

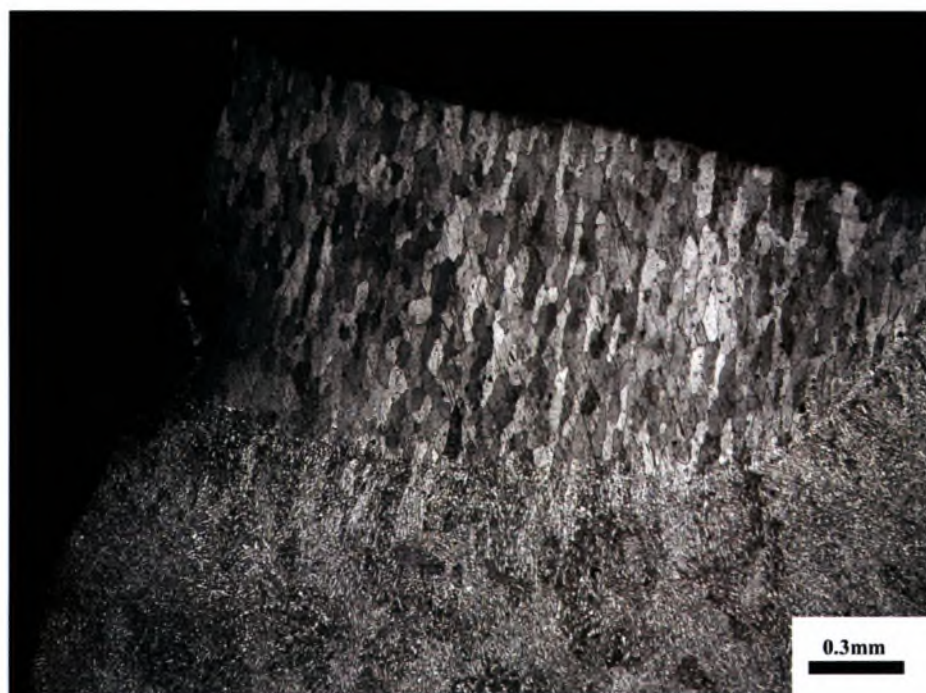
Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.29 και 4.30 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 3, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.31. Σε αυτές τις τομές το δοκίμιο δεν είναι καθόλου πορώδες. Στο σχήμα 4.32 παρουσιάζεται έντονη τρημματική διάβρωση στο δοκίμιο και συγκεκριμένα στην συγκόλλησης. Επίσης στο σχήμα 4.33 φαίνεται ότι το φαινόμενο της διάβρωσης δεν συνεχίζεται μακριά από τη συγκόλληση. Η ενίσχυση είτε στο πρόσωπο είτε στη ρίζα φαίνεται ότι παίζει καθοριστικό ρόλο για την έναρξη της ρωγμής κόπωσης στη συγκεκριμένη περιοχή του δοκιμίου λόγω της ύπαρξης εγκοπής στην ενίσχυση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.34.



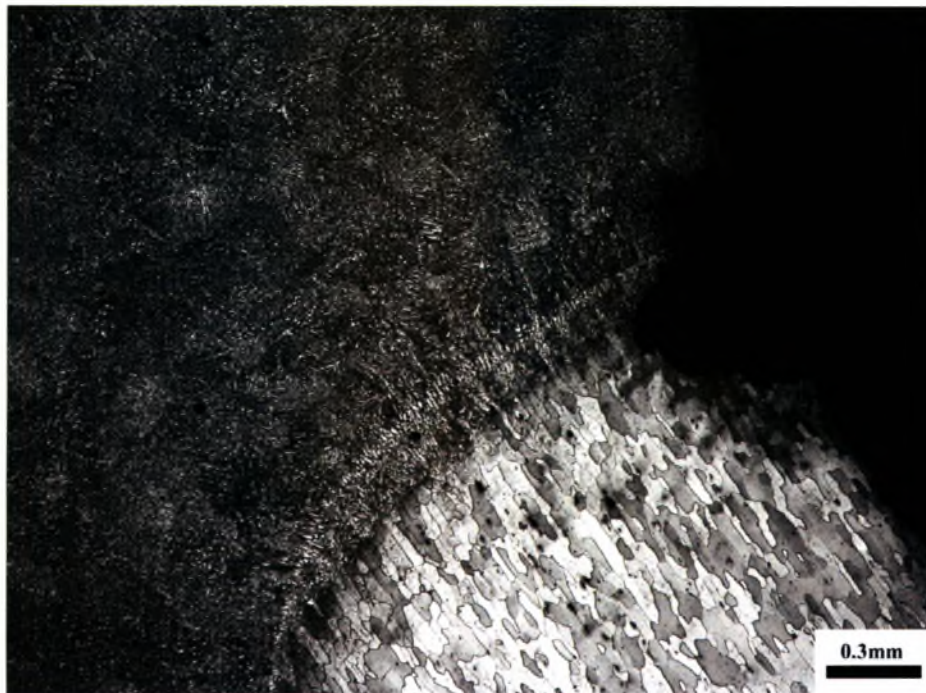
Σχήμα 4.29: Μακρογραφία δοκιμίου 3a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).



Σχήμα 4.30: Μακρογραφία δοκιμίου 3b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).



Σχήμα 4.31: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 3a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).



Σχήμα 4.32: Έντονη τρημματική διάβρωση στη συγκόλληση στο δοκίμιο 3a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).

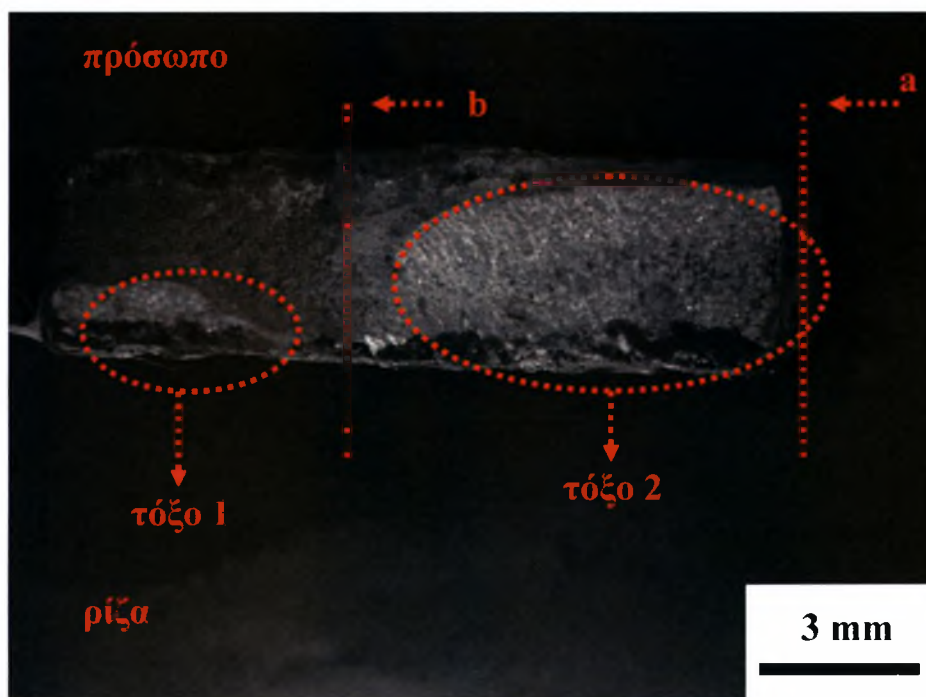


Σχήμα 4.33: Το φαινόμενο της διάβρωσης δεν συνεχίζεται μακριά από τη συγκόλληση στο δοκίμιο 3b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).



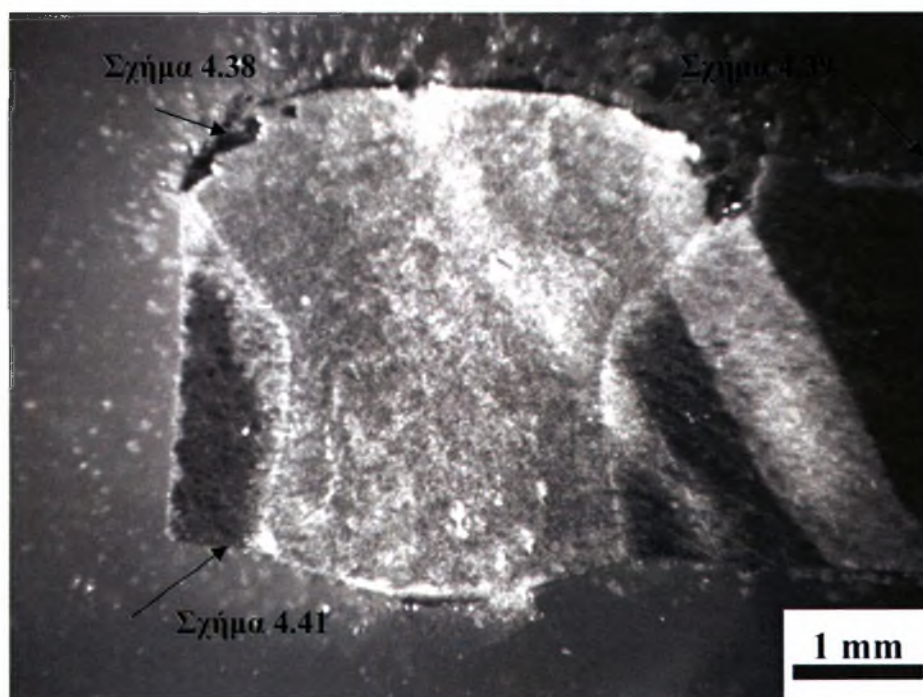
Σχήμα 4.34: Πιθανή έναρξη ρωγμής κόπωσης λόγω ύπαρξης εγκοπής στο δοκίμιο 3a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 857.628$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 4 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο έχει ύψος 1.28mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 3mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 4 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.35.

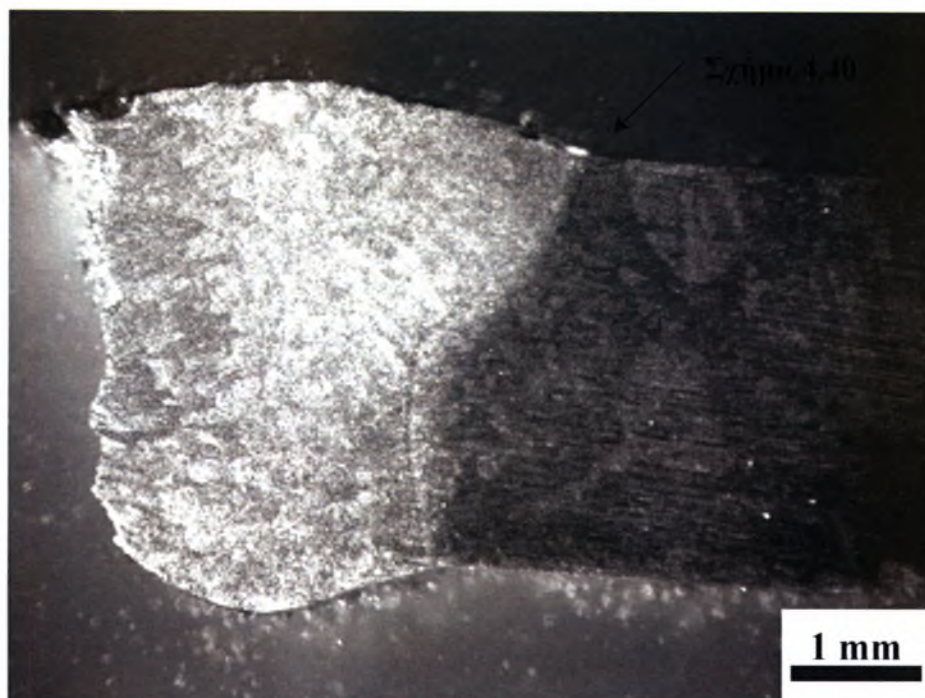


Σχήμα 4.35: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 4 ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).

Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.36 και 4.37 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 4, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.38. Σε αυτές τις τομές το δοκίμιο δεν είναι καθόλου πορώδες. Στα σχήματα 4.39 και 4.40 παρατηρείται έντονη διάβρωση με περικρυσταλλικό χαρακτήρα κοντά στη συγκόλληση. Στο βασικό μέταλλο η επιρροή της διάβρωσης είναι πολύ μικρή. Επίσης στο σχήμα 4.41 εμφανίζεται μια εγκοπή η οποία είναι πιθανή έναρξη ρωγμής κόπωσης.



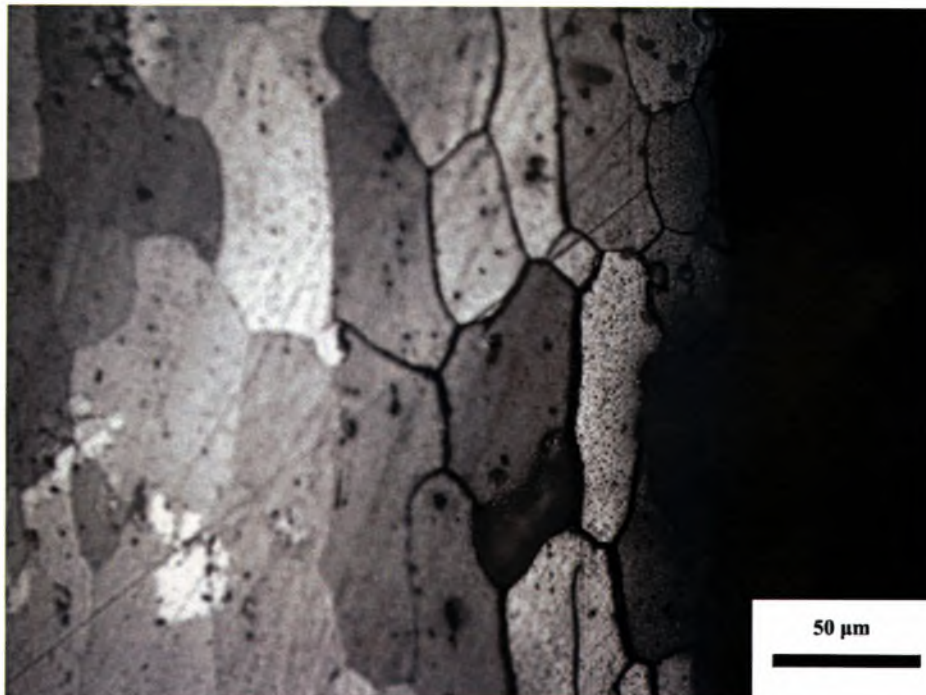
Σχήμα 4.36: Μακρογραφία δοκιμίου 4a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).



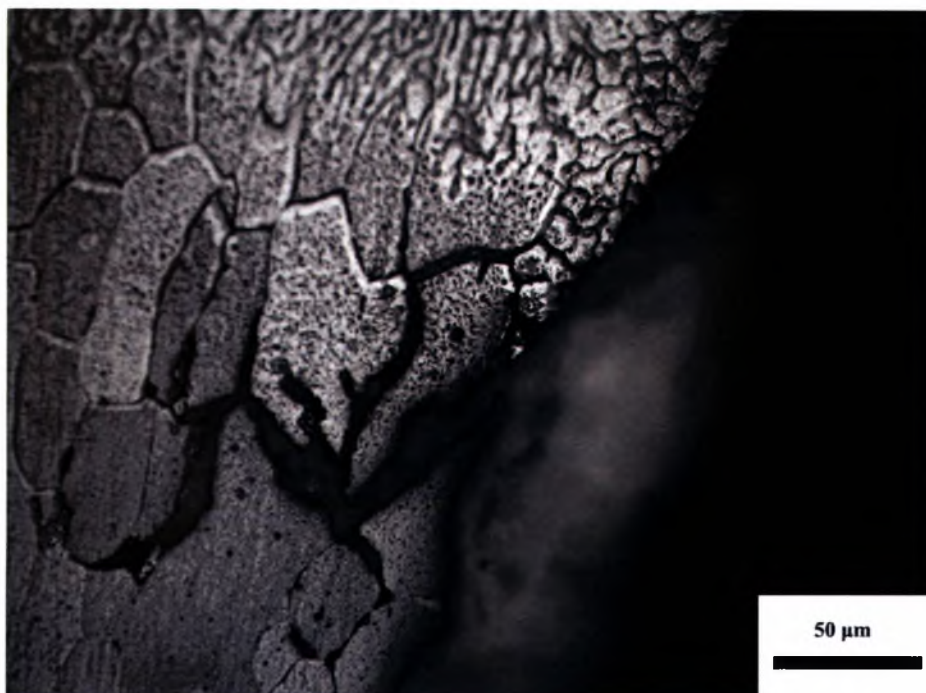
Σχήμα 4.37: Μακρογραφία δοκιμίου 4b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).



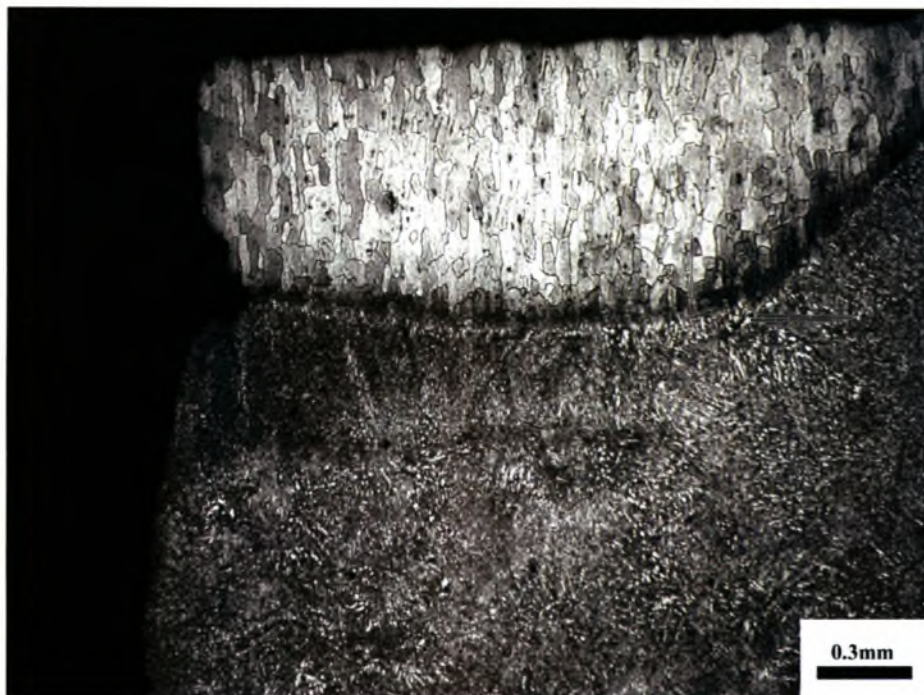
Σχήμα 4.38: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στο πρόσωπο της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 4a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).



Σχήμα 4.39: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 4a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).

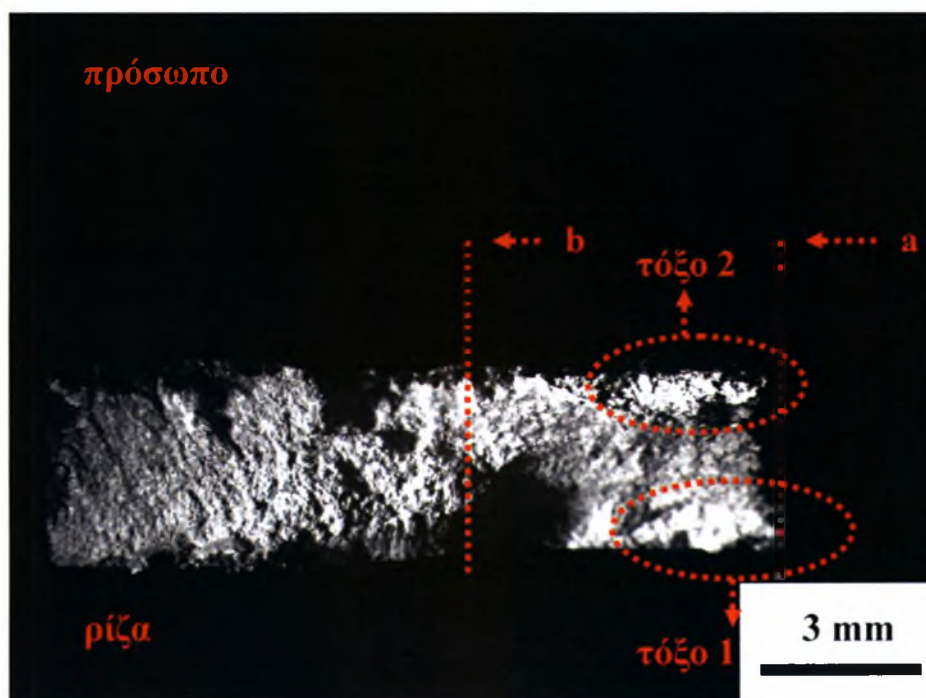


Σχήμα 4.40: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 4b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).



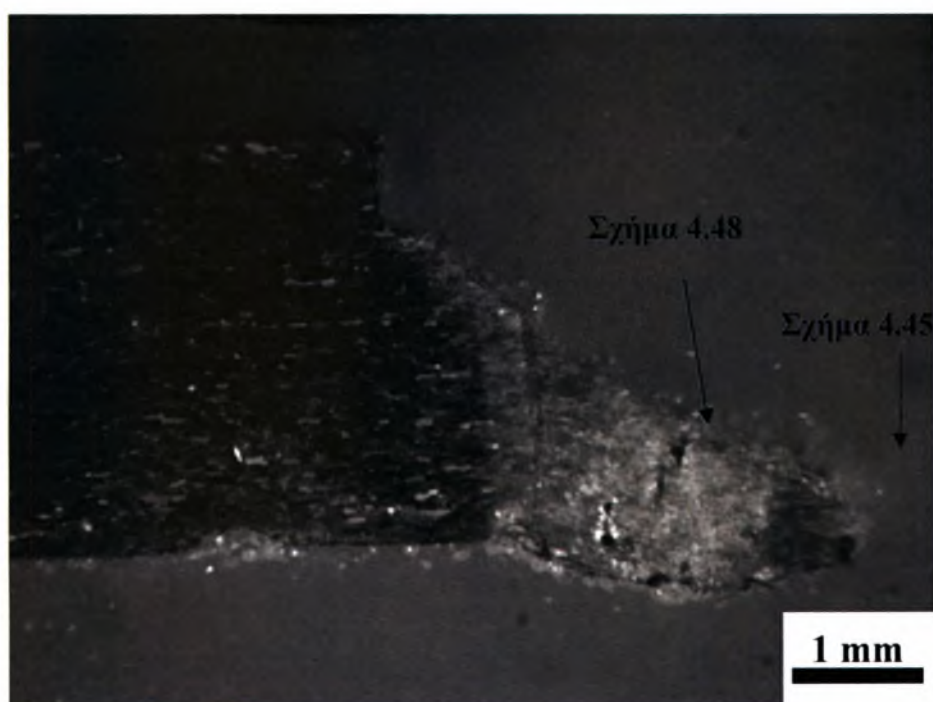
Σχήμα 4.41: Πιθανή έναρξη ρωγμής κόπωσης λόγω ύπαρξης εγκοπής στο δοκίμιο 4b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 344.410$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 5 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο έχει ύψος 0,86mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 0,78mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 5 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.42.

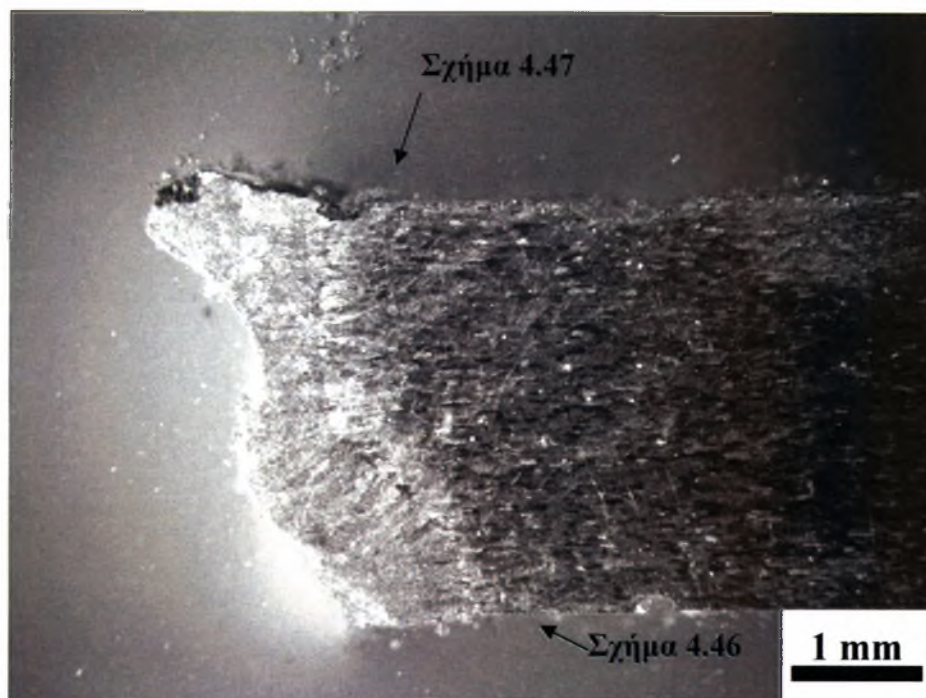


Σχήμα 4.42: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 5 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).

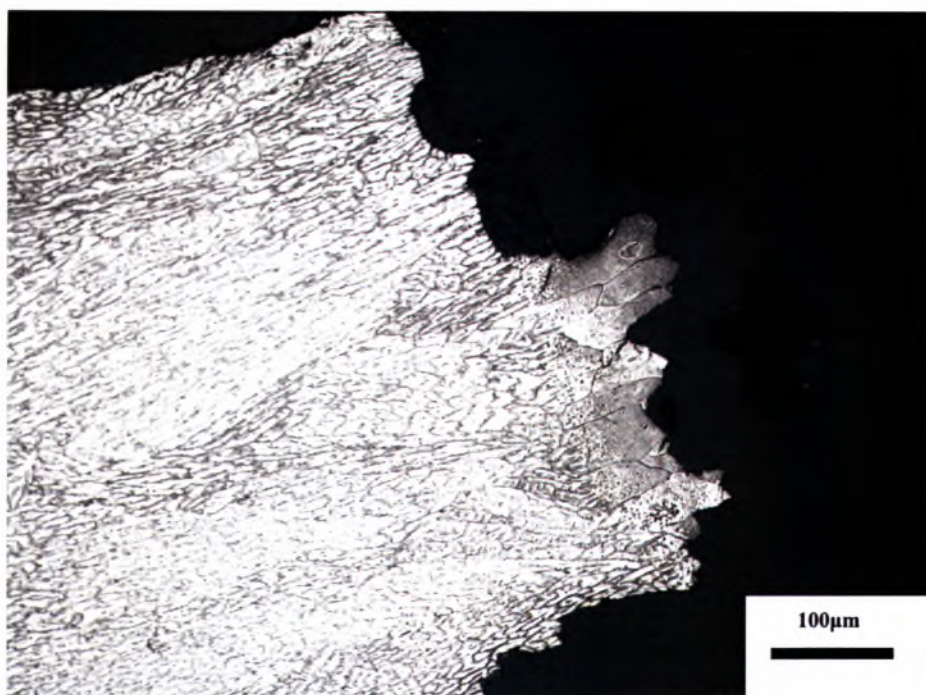
Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.43 και 4.44 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 5, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.45. Στα σχήματα 4.46 και 4.47 παρατηρείται έντονη διάβρωση με περικρυσταλλικό χαρακτήρα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.48 το μέταλλο της συγκόλλησης δεν έχει ανοχή στη διάβρωση.



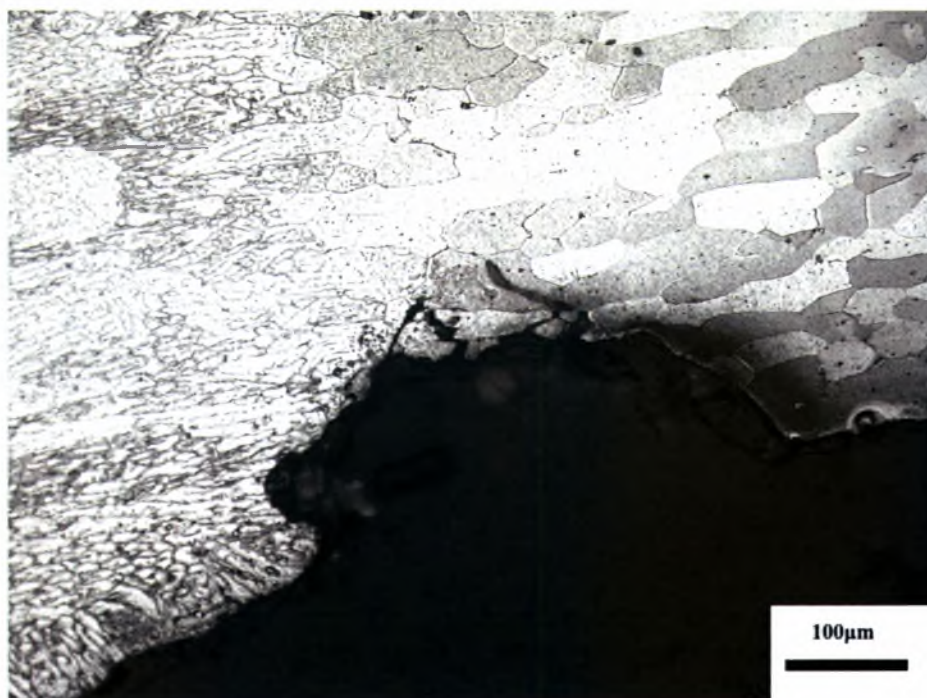
Σχήμα 4.43: Μακρογραφία δοκιμίου 5a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).



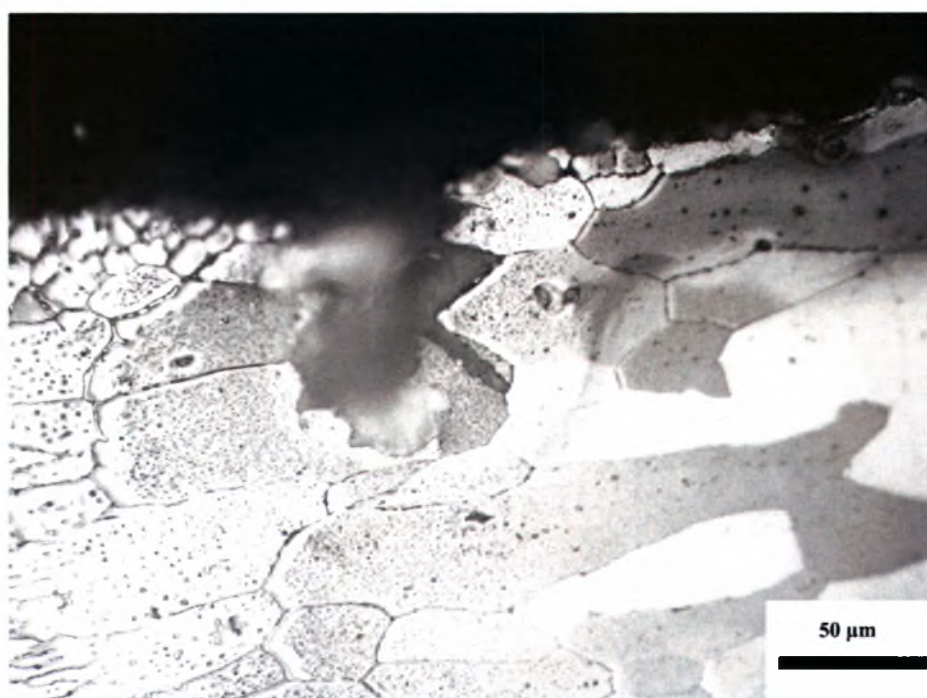
Σχήμα 4.44: Μακρογραφία δοκιμίου 5b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).



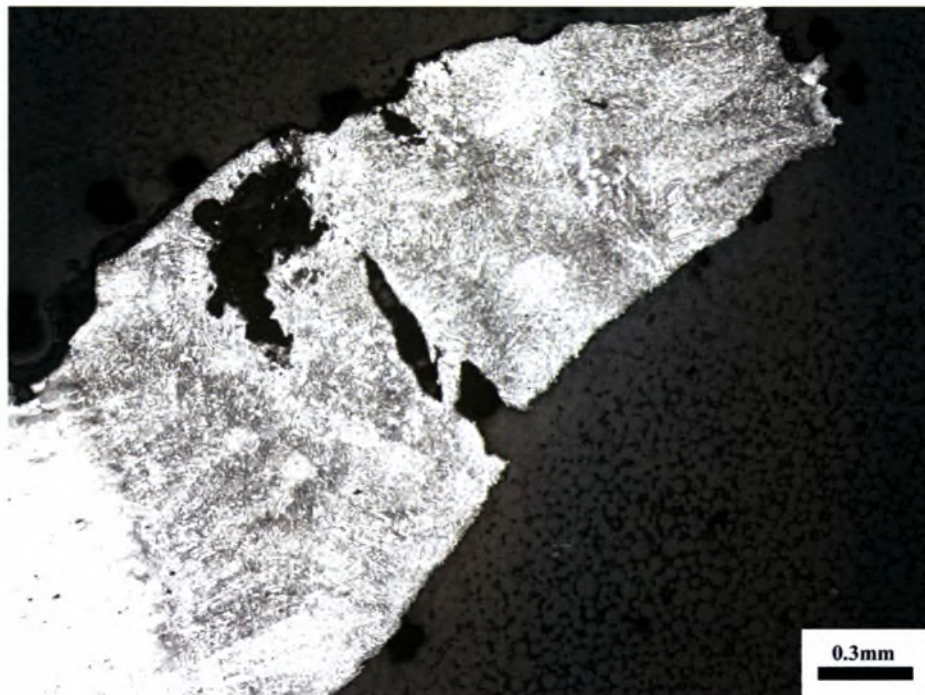
Σχήμα 4.45: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στο πρόσωπο της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 5a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).



Σχήμα 4.46: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 5b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).



Σχήμα 4.47: Περικρυσταλλική διάβρωση μετάλλου στο δοκίμιο 5b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).



Σχήμα 4.48: Το μέταλλο της συγκόλλησης δεν έχει ανοχή στη διάβρωση στο δοκίμιο 5a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 78.446$).

Όπως στα αδιάβρωτα, έτσι και στα διαβρωμένα υπολογίστηκαν, με τον ίδιο τρόπο, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας θραύσης αλλά και της ενίσχυσης για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις παρουσιάζονται στους πίνακες 4.49 και 4.50. Εφόσον το δοκίμιο 2 δεν έσπασε, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, δεν μπορούμε να δούμε τα τόξα κόπωσης. Το ύψος της ενίσχυσης είναι κατά μέσο όρο 0.35mm τόσο στο πρόσωπο όσο και στη ρίζα ενώ σχηματίζει γωνία περίπου 180° με το μέταλλο βάσης.

Πίνακας 4.49: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης.

2139 – T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΑ		
Δοκίμιο	Ύψος τόξου 1 (mm)	Ύψος τόξου 2 (mm)
2	-	-
3	0,85	1
4	1,28	3
5	0,86	0,78

Πίνακας 4.50: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης.

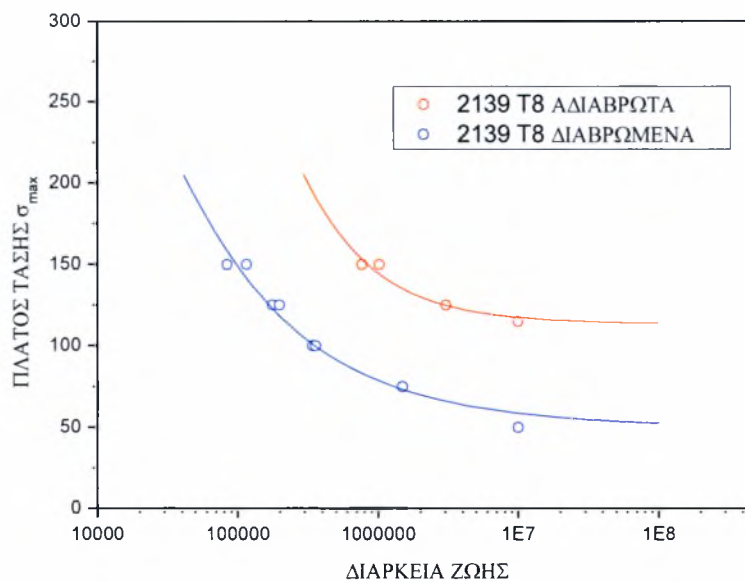
2139 – T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΑ				
Δοκίμιο	Κλίση ενίσχυσης στην επιφάνεια	Κλίση ενίσχυσης στη ρίζα	Ύψος ενίσχυσης στην επιφάνεια (mm)	Ύψος ενίσχυσης στη ρίζα (mm)
2	171°	165°	0.18	0.5
3	183°	210°	0.44	0.38
4	160°	183°	0.35	0.38
5	200°	185°	0.26	0.28

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.4 η αντοχή σε κόπωση των διαβρωμένων δοκιμίων έχει μειωθεί στο 1/10 σε σχέση με τα αδιάβρωτα δοκίμια. Από τη μεταλλουργική αξιολόγηση προκύπτει ότι στα δοκίμια αυτά υπάρχει έντονη τρημματική διάβρωση εντοπισμένη στη συγκόλληση, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του δοκιμίου έχει παραμείνει ανεπηρέαστο από τη διάβρωση.

Και στα τέσσερα αυτά δοκίμια ο χαρακτήρας της διάβρωσης είναι περικρυσταλλικός. Οι ρωγμές της κόπωσης δημιουργούνται στον πυθμένα των τρημμάτων και στη συνέχεια διαδίδονται κάθετα προς τη διεύθυνση φόρτισης οδηγούμενες από την επιβαλλόμενη τάση κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης.

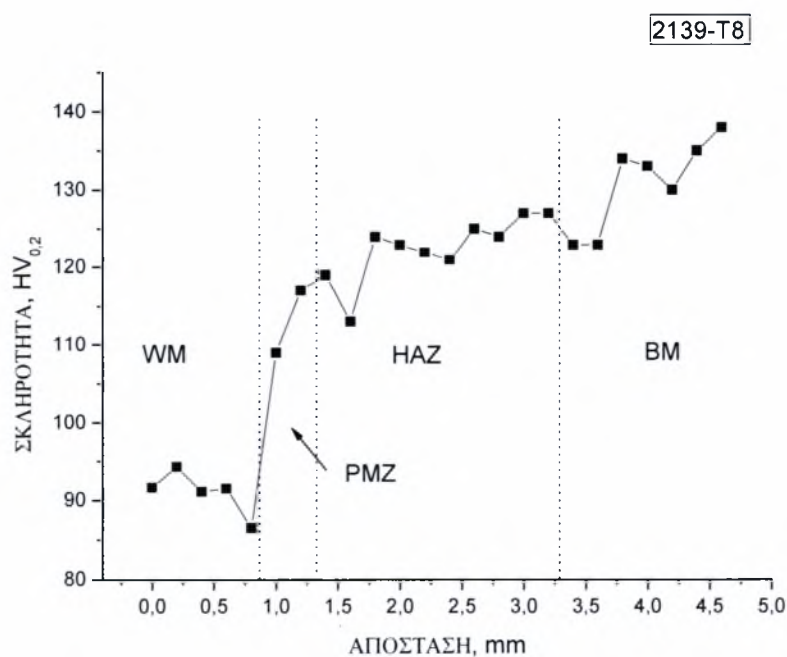
4.2 Κράμα 2139 - T8

Στο διάγραμμα 4.51 παρουσιάζονται οι καμπύλες Wheeler του κράματος 2139 – T8. Το όριο διαρκούς αντοχής στα μη διαβρωμένα είναι 125 MPa, ενώ στα διαβρωμένα 65 MPa. Επομένως στα διαβρωμένα είναι μειωμένο κατά 60 MPa.



Διάγραμμα 4.51: Καμπύλες Wheeler του κράματος 2139-T8.

Στο διάγραμμα 4.52 παρουσιάζεται το προφίλ μικροσκληρομέτρησης που έγινε στο κράμα 2139-T8. Παρατηρούμε, όπως και στο κράμα 2139-T3, μεταβολές των τιμών όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της συγκόλλησης. Η σκληρότητα στην λίμνη συγκόλλησης είναι 90 HV, στην ζώνη μερικής τήξης 110 HV, στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη 125 HV και στο βασικό μέταλλο 135 HV.

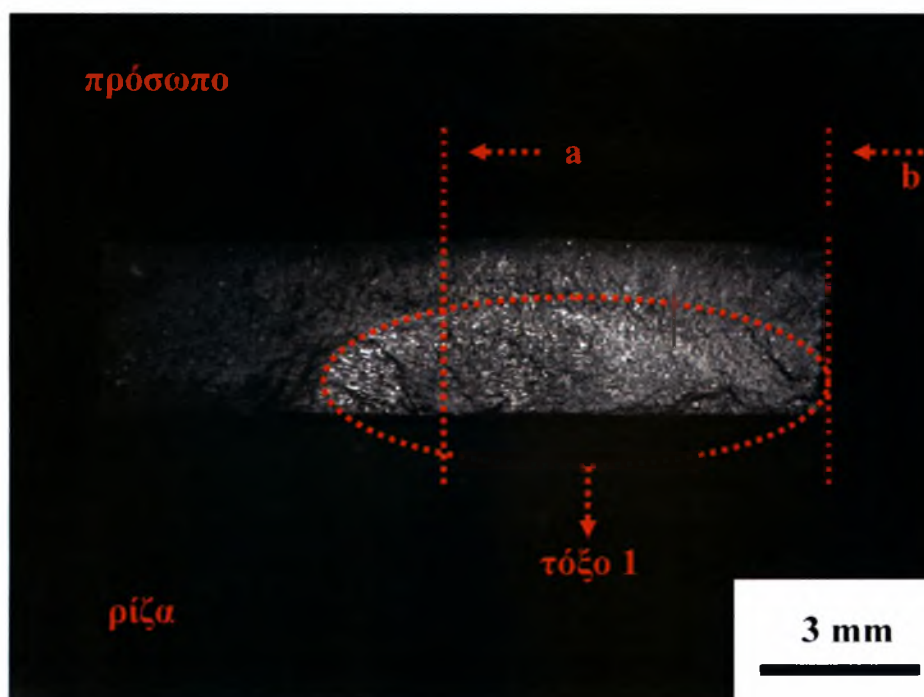


Διάγραμμα 4.52: Προφίλ μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 2139-T8.

4.2.1 Αδιάβρωτα δοκίμια

Για την μελέτη του υλικού 2139 – T8 χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά αδιάβρωτα δοκίμια. Τα δοκίμια αυτά είναι το 15 και το 26, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.5. Και στα δύο αυτά δοκίμια έγινε η κατάλληλη προετοιμασία για την μελέτη τους στο στερεοσκόπιο και στο μικροσκόπιο. Η θέση θραύσης όλων των δοκιμίων ήταν στην περιοχή της συγκόλλησης. Είναι γνωστό ότι τα κέντρα των τόξων που εμφανίζονται στην επιφάνεια θραύσης είναι σημεία έναρξης ρωγμών. Για το λόγο αυτό μελετήσαμε στο στερεοσκόπιο τις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων.

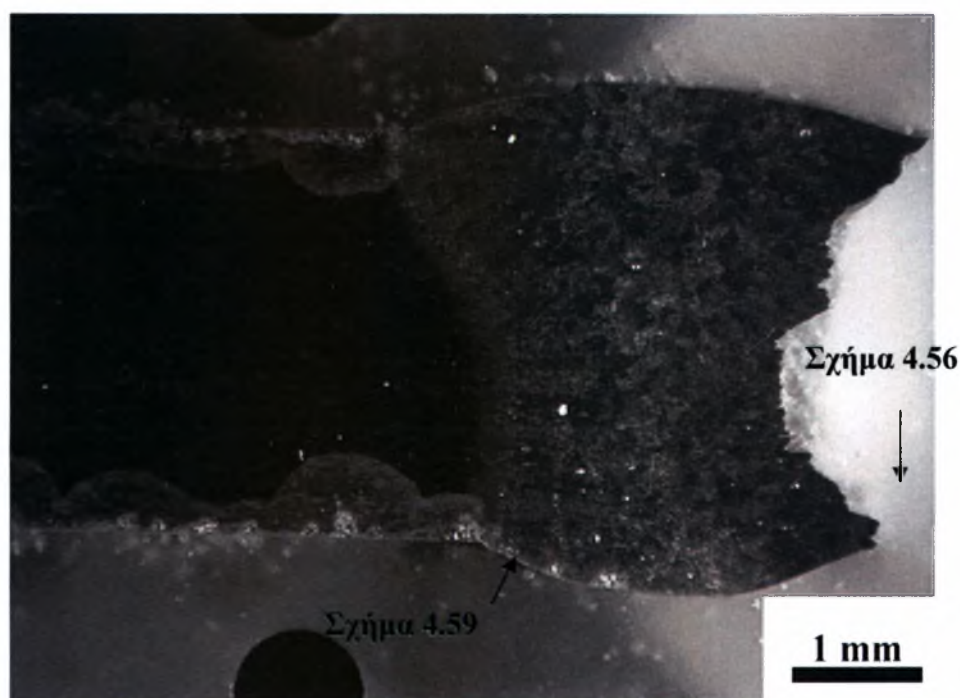
Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 15 υπάρχει ένα τόξο ύψους 2mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 15 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.53, ακριβώς στο κέντρο της περιοχής κόπωσης.



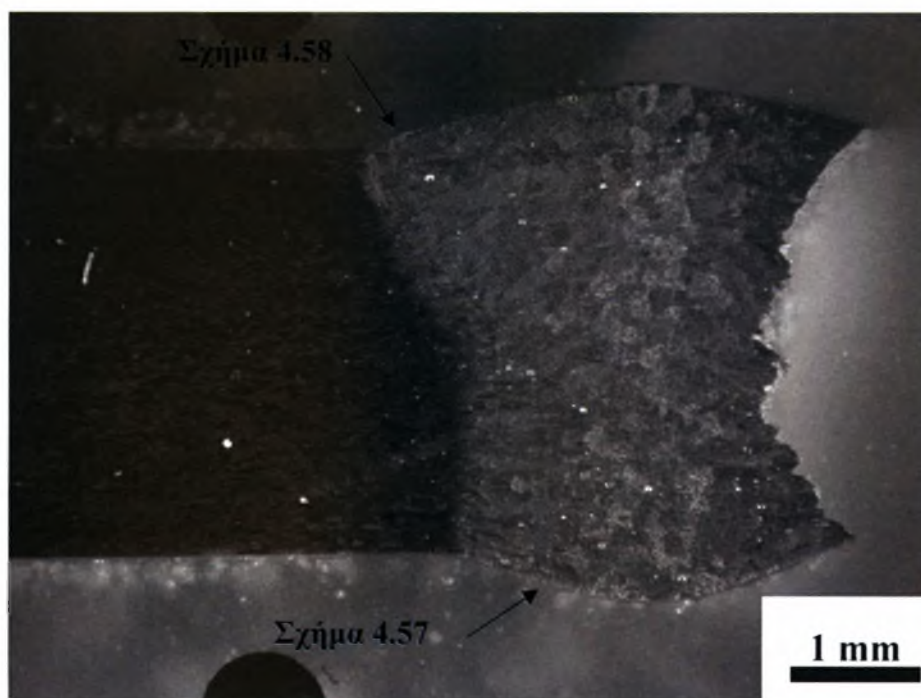
Σχήμα 4.53: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 15 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).

Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.54 και 4.55 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 15, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο.

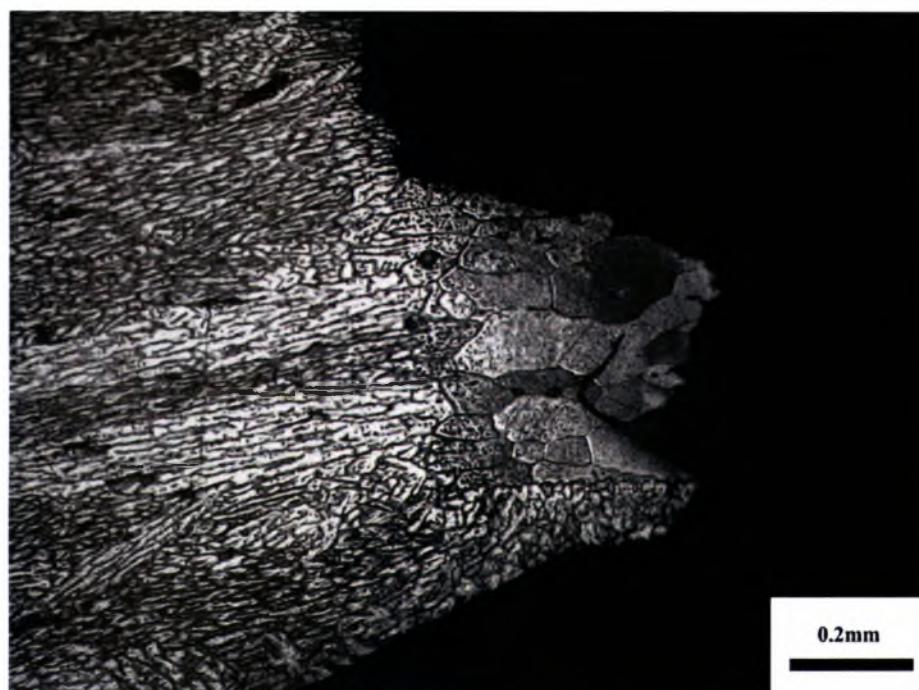
Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.56. . Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.57 υπάρχουν αρκετοί πόροι τόσο στη ρίζα όσο και στο κέντρο της συγκόλλησης. Εκτός από την κύρια ρωγμή που οδήγησε το δοκίμιο σε αστοχία εντοπίστηκαν και δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης και στο πρόσωπο αλλά και στη ρίζα που αναπτύσσονται παράλληλα ακριβώς στην ίδια περιοχή. Οι ρωγμές αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 4.58 και 4.59.



Σχήμα 4.54: Μακρογραφία δοκιμίου 15a ($\sigma_{max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).



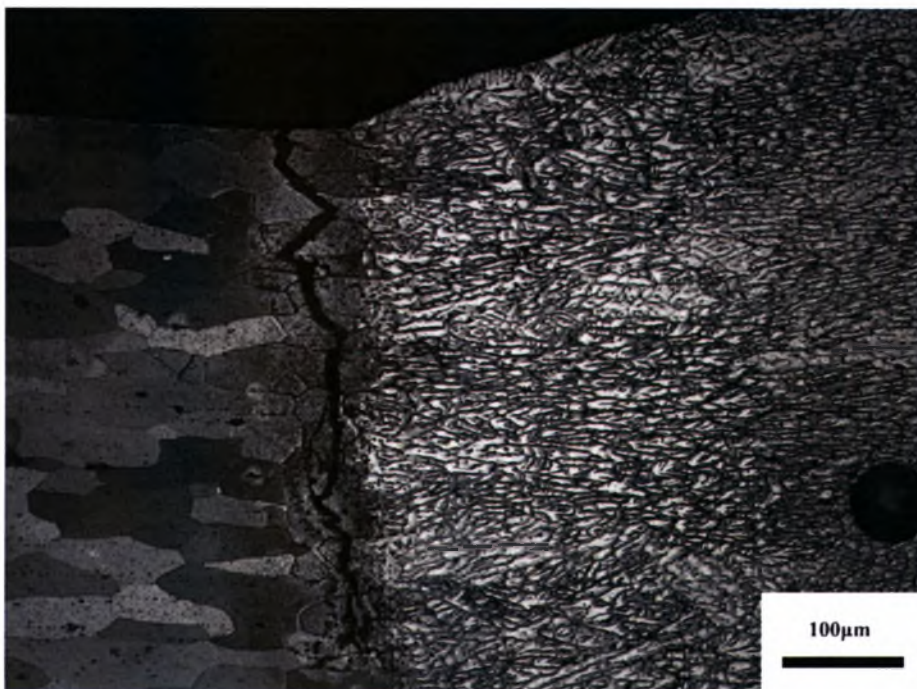
Σχήμα 4.55: Μακρογραφία δοκιμίου 15b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).



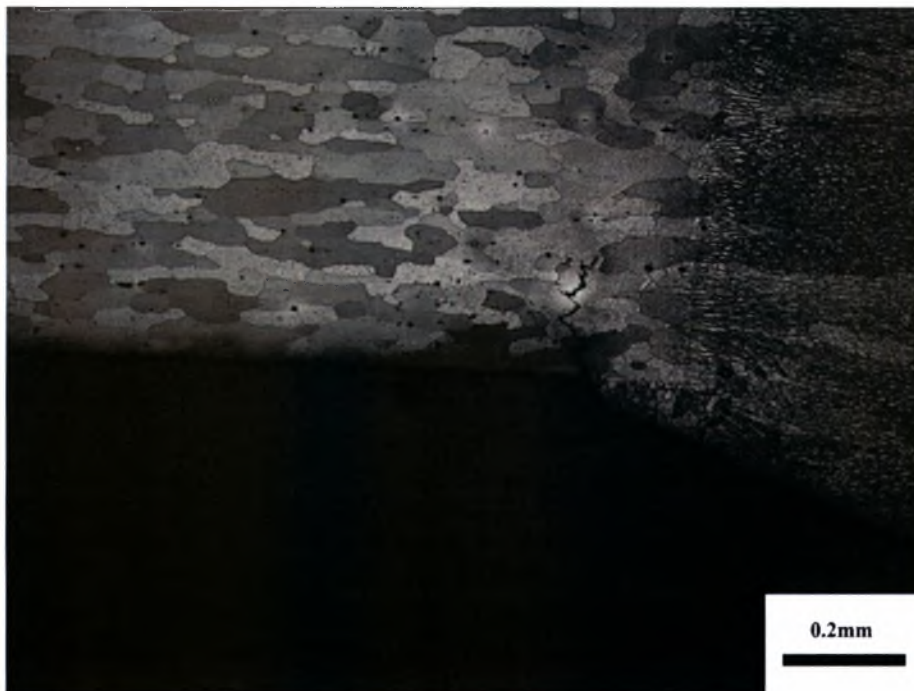
Σχήμα 4.56: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 15a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).



Σχήμα 4.57: Πόροι στο κέντρο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 15b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).

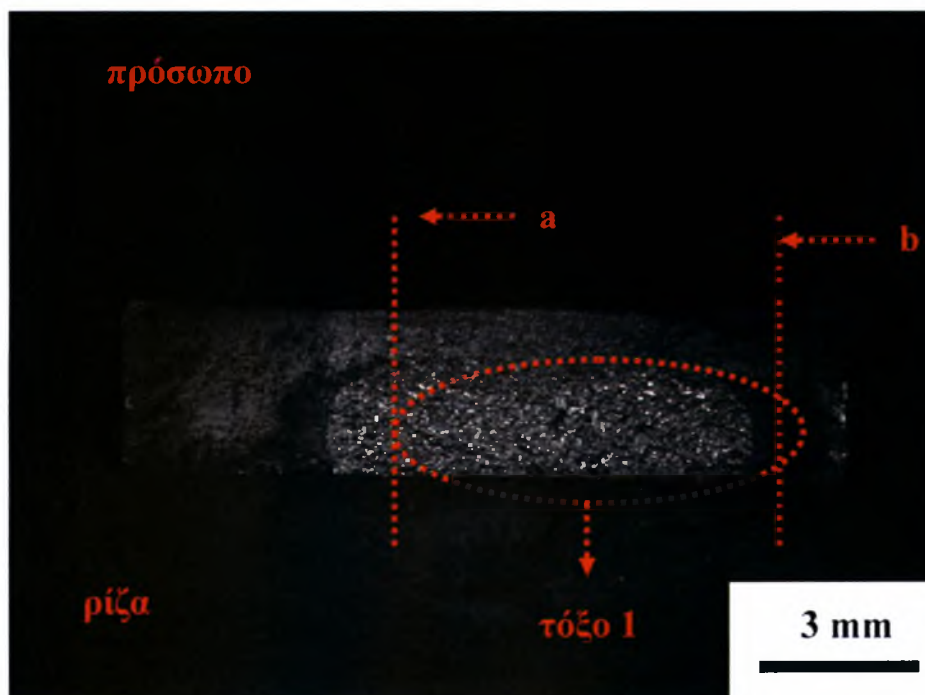


Σχήμα 4.58: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 15b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).



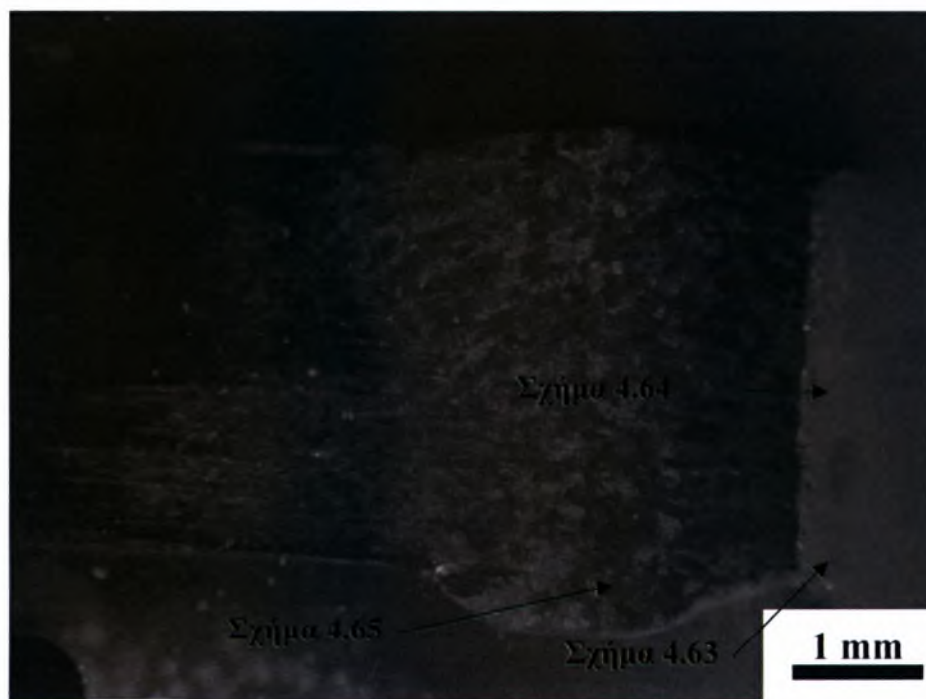
Σχήμα 4.59: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο δοκίμιο 15a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 1.020.939,50$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 26 υπάρχει ένα τόξο ύψους 2,14mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 26 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.60, ακριβώς στο κέντρο της περιοχής κόπωσης.

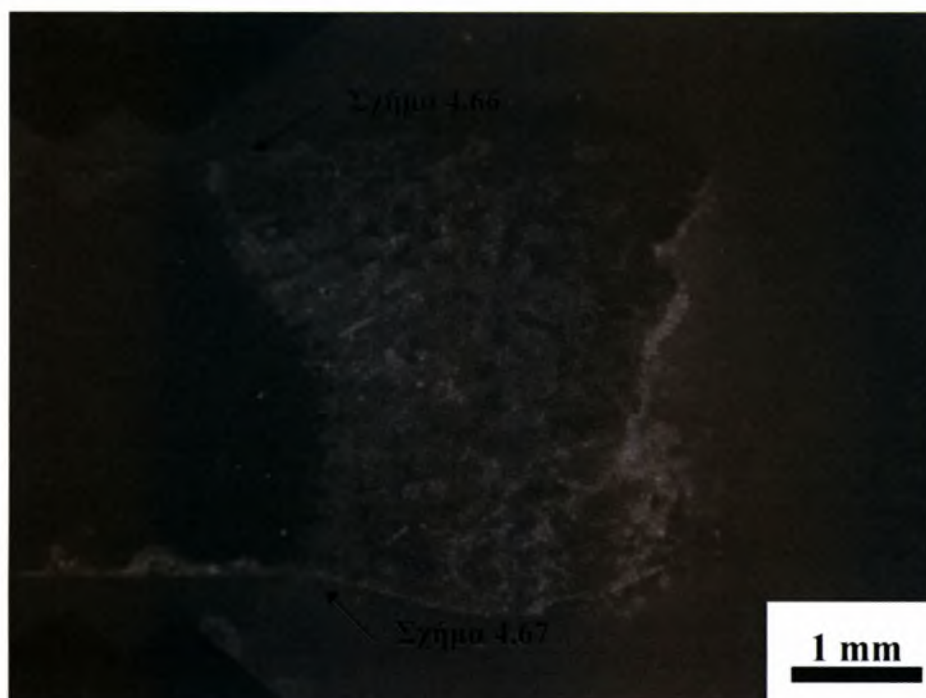


Σχήμα 4.60: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 26 ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).

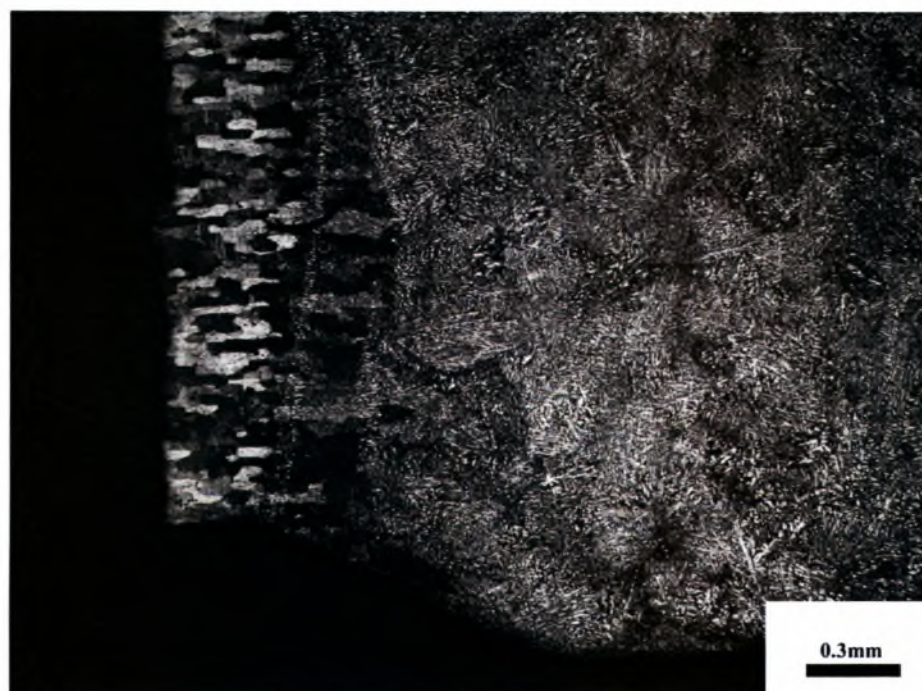
Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.61 και 4.62 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 26, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.63 και 4.64. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.65 δεν υπάρχουν πόροι τόσο στη ρίζα όσο και στο κέντρο της συγκόλλησης, ενώ η ενίσχυση στην ρίζα της συγκόλλησης είναι πολύ έντονη. Από τα σχήματα 4.66 και 4.67 παρατηρείται ότι εκτός από την κύρια ρωγμή που οδήγησε το δοκίμιο σε αστοχία δεν εντοπίστηκαν δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης τόσο στο πρόσωπο όσο και στη ρίζα της συγκόλλησης.



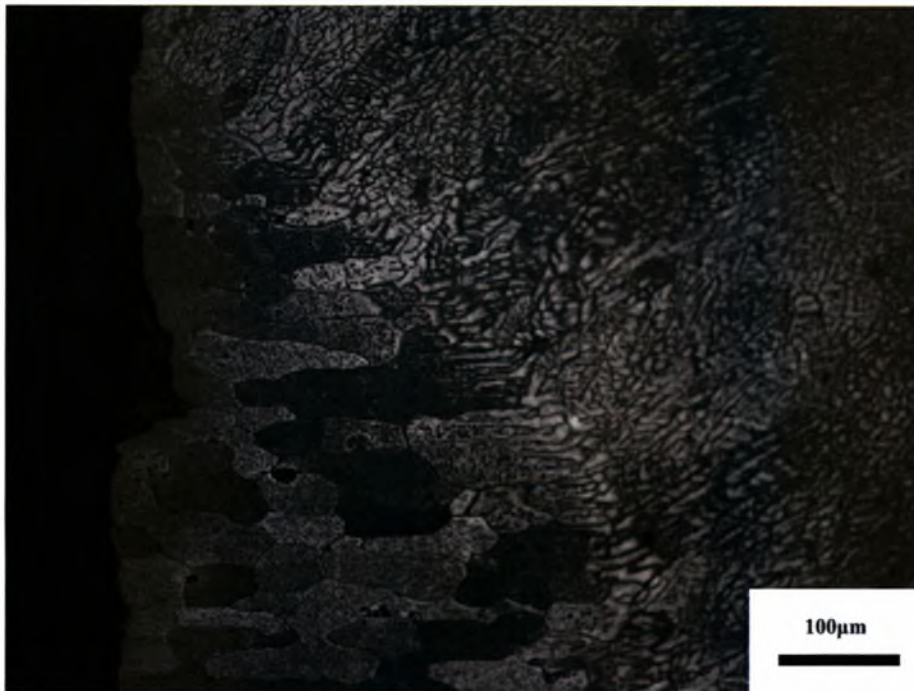
Σχήμα 4.61: Μακρογραφία δοκιμίου 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).



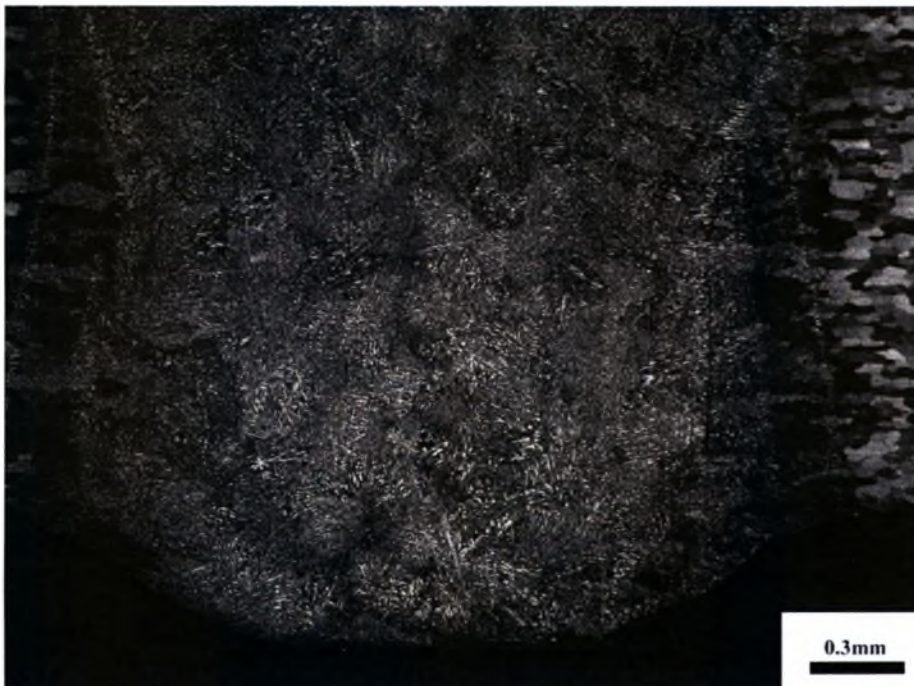
Σχήμα 4.62: Μακρογραφία δοκιμίου 26b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).



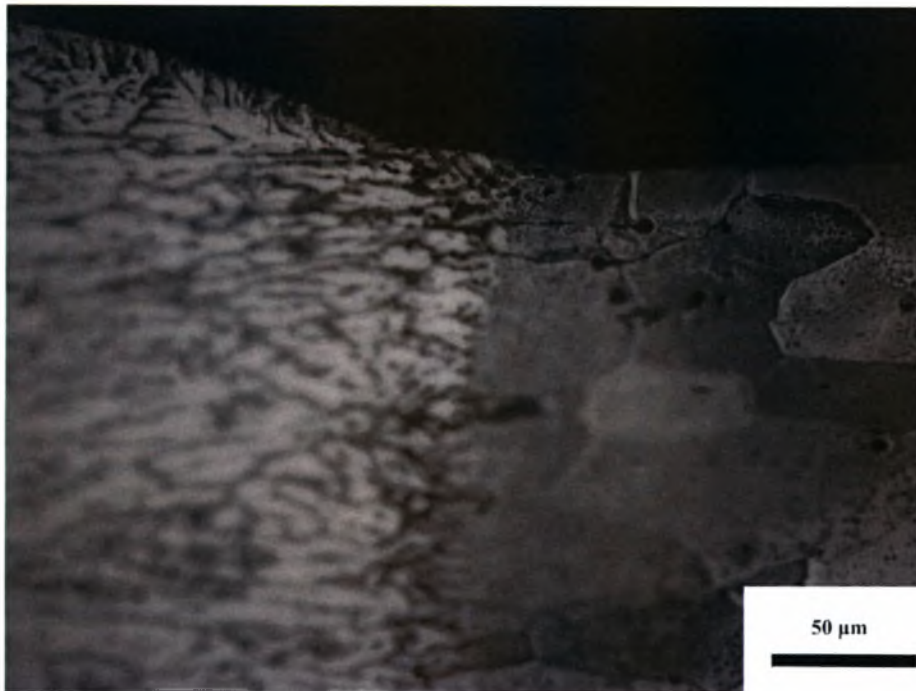
Σχήμα 4.63: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).



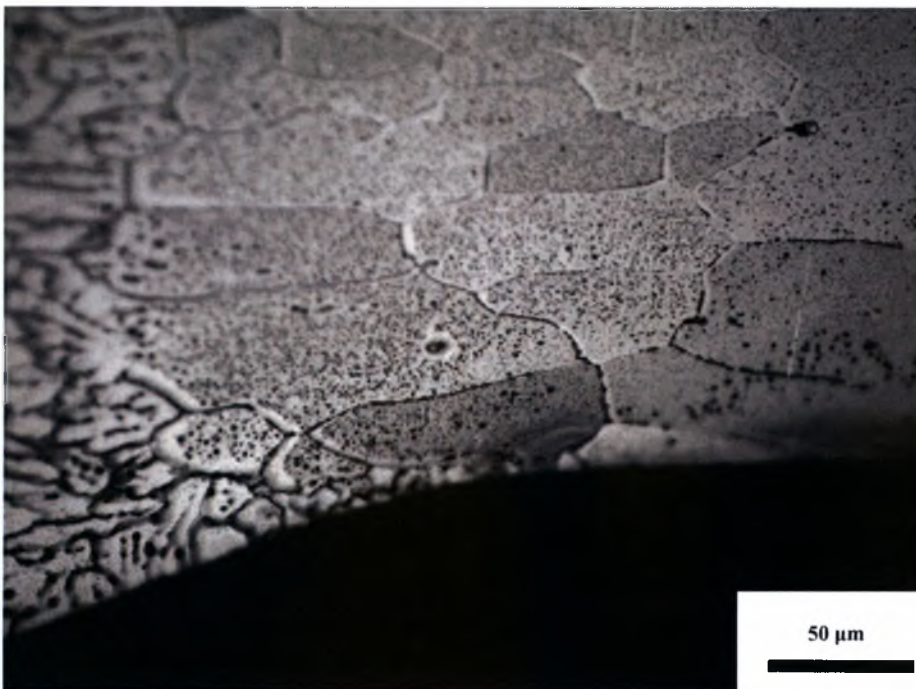
Σχήμα 4.64: Διάδοση της ρωγμής κόπωσης στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).



Σχήμα 4.65: Ελάχιστο πορώδες και έντονη ενίσχυση στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 26a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).



Σχήμα 4.66: Το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 26b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).



Σχήμα 4.67: Η ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 26b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 3.052.866$).

Συνολικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης, όπως τα ύψη των τόξων, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.68 για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά.

Πίνακας 4.68: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης.

2139 – T8 ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ	
Δοκίμιο	Ύψος τόξου 1 (mm)
15	2
26	2.14

Σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά μετρήθηκε το ύψος της ενίσχυσης. Στον πίνακα 4.69 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Το ύψος της ενίσχυσης είναι κατά μέσο όρο 0.36 mm τόσο στο πρόσωπο όσο και στη ρίζα ενώ σχηματίζει γωνία περίπου 160° με το μέταλλο βάσης.

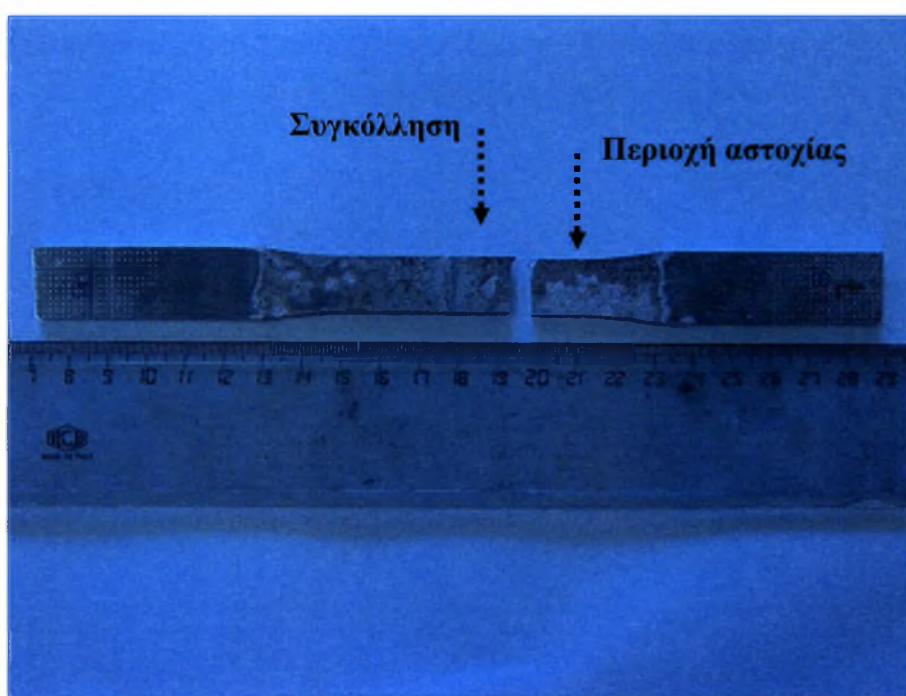
Πίνακας 4.69: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης.

2139 – T8 ΑΔΙΑΒΡΩΤΑ				
Δοκίμιο	Κλίση ενίσχυσης στην επιφάνεια	Κλίση ενίσχυσης στη ρίζα	Ύψος ενίσχυσης στην επιφάνεια (mm)	Ύψος ενίσχυσης στη ρίζα (mm)
15	165°	140°	0,38	0,35
26	152°	192°	0,29	0,41

Η συμπεριφορά της κατηγορίας αυτής των δειγμάτων σε κόπωση είναι αντίστοιχη αυτής του κράματος 2139-T3. Και σε αυτά τα δείγματα το σημείο έναρξης των ρωγμών κόπωσης εντοπίζεται στη διεπιφάνεια του μετάλλου συγκόλλησης με τη ζώνη μερικής τήξης. Ρωγμές κόπωσης εντοπίζονται τόσο στην πλευρά της ρίζας της συγκόλλησης όσο και στην πλευρά του προσώπου. Δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης εντοπίζονται μόνο σε μέγιστη τάση 150 MPa, και η ενίσχυση φαίνεται ότι παίζει και εδώ τον κύριο ρόλο λόγω της δημιουργίας εγχοπών στην διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ζώνης μερικής τήξης.

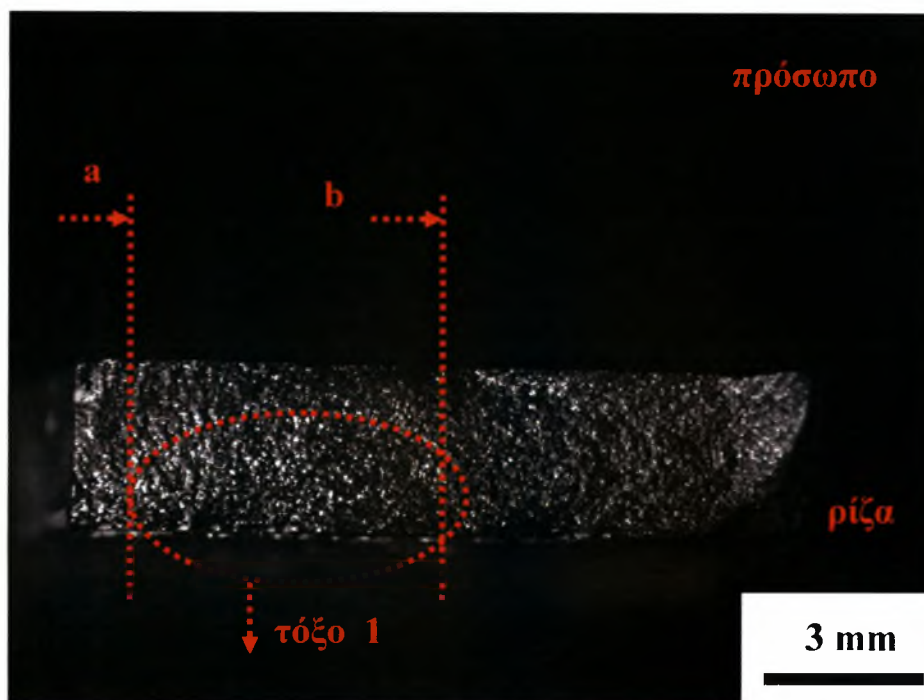
4.2.2 Δοκίμια που έχουν υποστεί αλατονέφωση για διάστημα 30 ημερών

Για την ολοκλήρωση της μελέτης του υλικού 2139 –T8 χρησιμοποιήθηκαν άλλα τρία δοκίμια, το 9, το 10 και το 12. Η διαφορά είναι ότι τα δοκίμια αυτά είναι διαβρωμένα. Ομοίως, στα δοκίμια αυτά, έγινε προετοιμασία για την μελέτη τους στο στερεοσκόπιο και στη συνέχεια στο μικροσκόπιο. Η κατηγορία αυτή των δειγμάτων διαφοροποιείται από τα προηγούμενα ως προς τη συμπεριφορά της σε διάβρωση. Η θραύση συμβαίνει μέσα στο μέταλλο βάσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.70, και σε απόσταση περίπου 10mm από τη συγκόλληση.

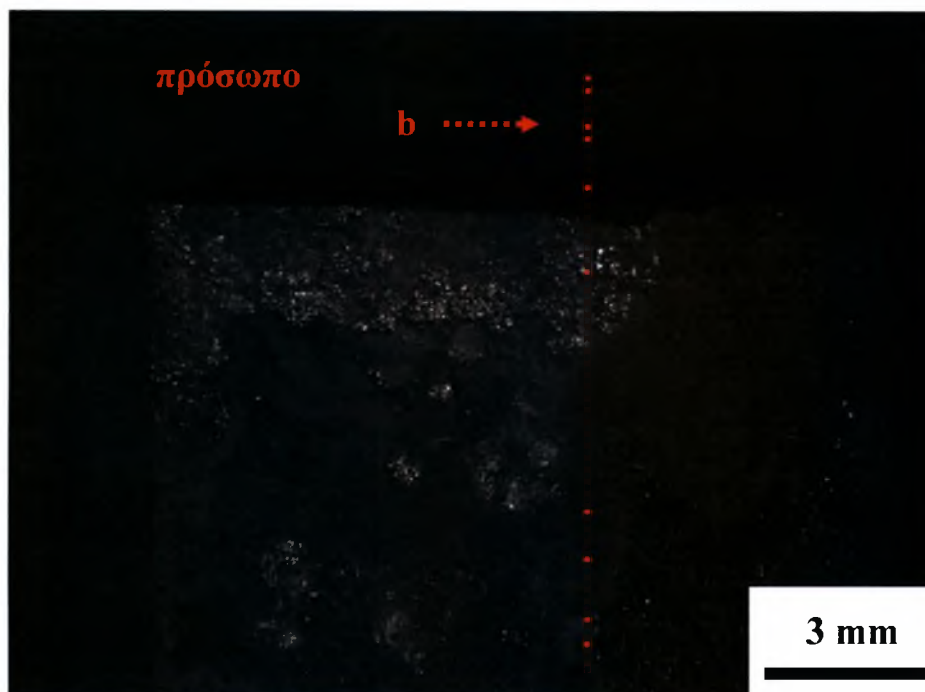


Σχήμα 4.70: Απόσταση της θραύσης από τη συγκόλληση σε διαβρωμένο δοκίμιο κράματος 2139 – T8.

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 9 υπάρχει ένα τόξο ύψους 2,29mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 9 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.71 και 4.72.

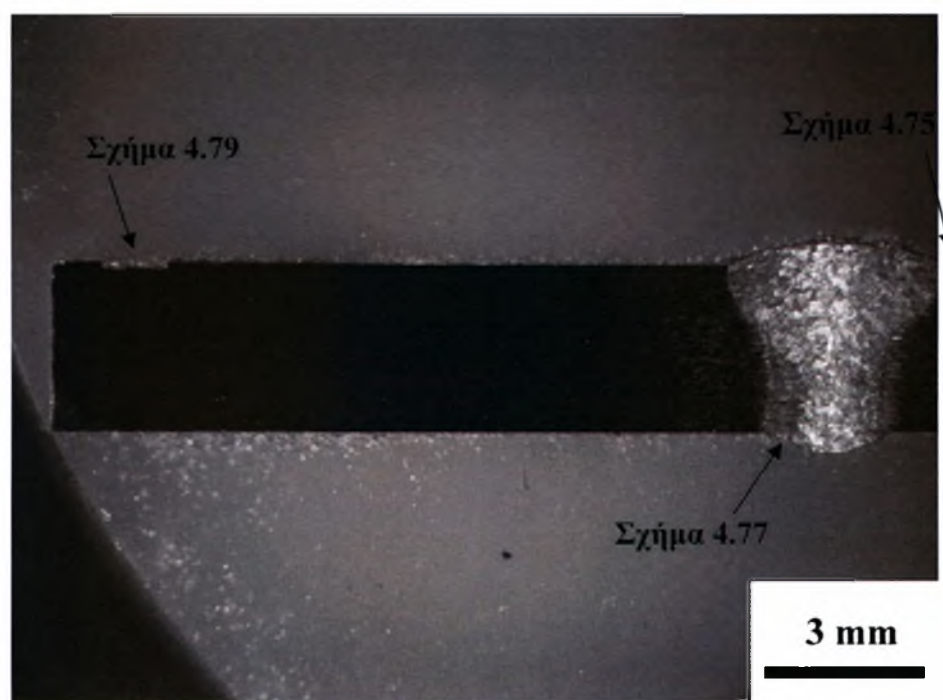


Σχήμα 4.71: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 9 ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).

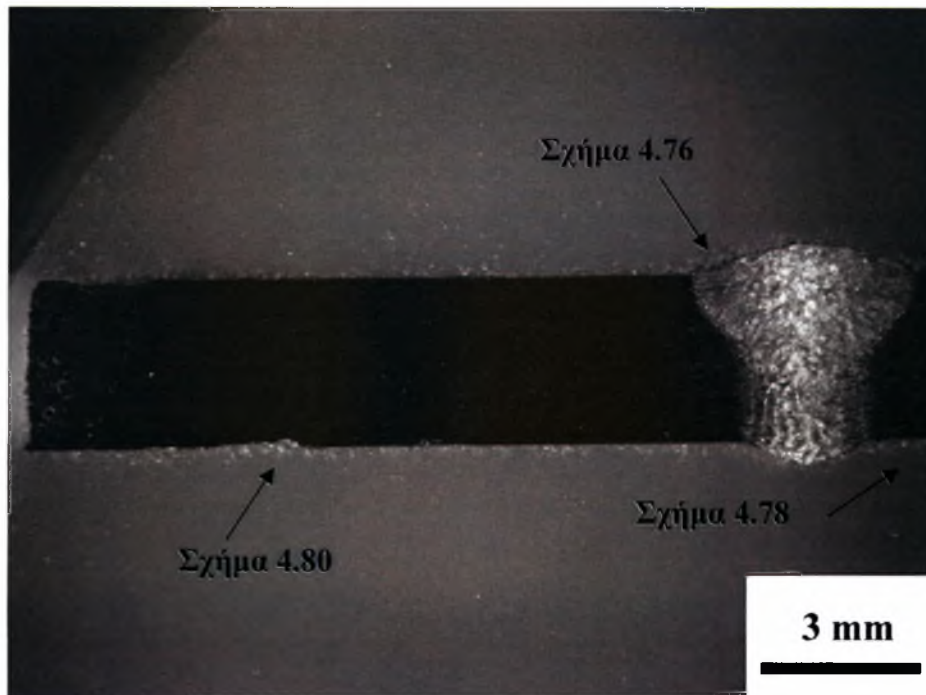


Σχήμα 4.72: Επιλογή τομής a – b του δοκιμίου 9 ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).

Στα σχήματα 4.73 και 4.74 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 9, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Παρατηρήθηκε ότι η περιοχή της συγκόλλησης εμφανίζεται ανθεκτικότερη από το μέταλλο βάσης και τη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και δεν παρουσιάζει καθόλου διάβρωση. Στα σχήματα 4.75 και 4.76 φαίνεται η αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης, ενώ στα σχήματα 4.77 και 4.78 κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης. Τα πρώτα τρήματα διάβρωσης εμφανίζονται σε απόσταση περίπου 5mm από το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης. Οι ρωγμές κόπωσης αναπτύσσονται στον πυθμένα των τρημάτων αυτών όπως διαπιστώνεται από την παρατήρηση στο στερεοσκόπιο και στο οπτικό μικροσκόπιο. Στα σχήματα 4.79 και 4.80 παρατηρείται η έντονη αυτή διάβρωση που εμφανίζεται μακριά από τη συγκόλληση.



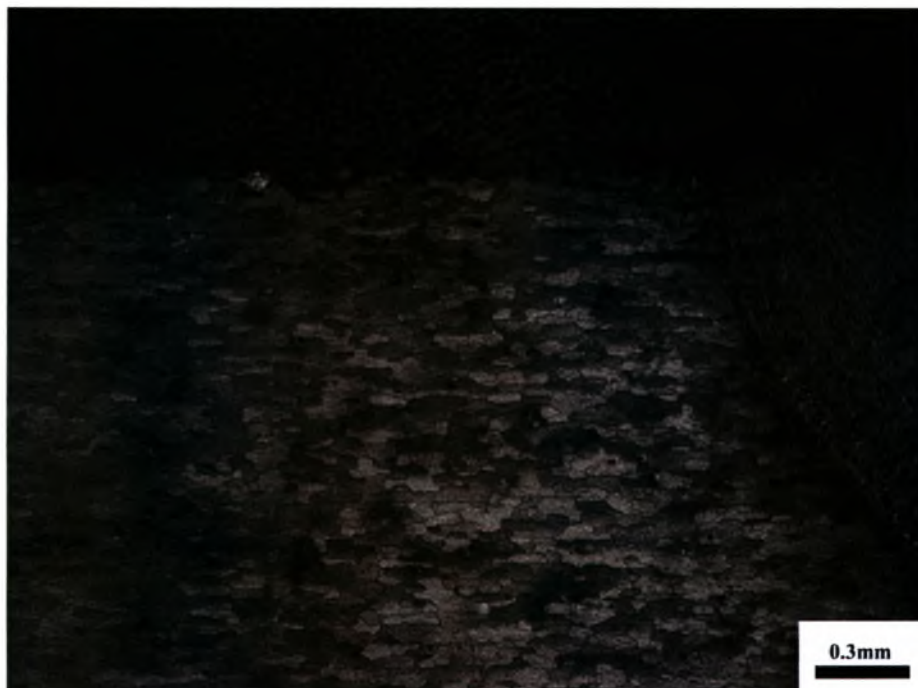
Σχήμα 4.73: Μακρογραφία του δοκιμίου 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).



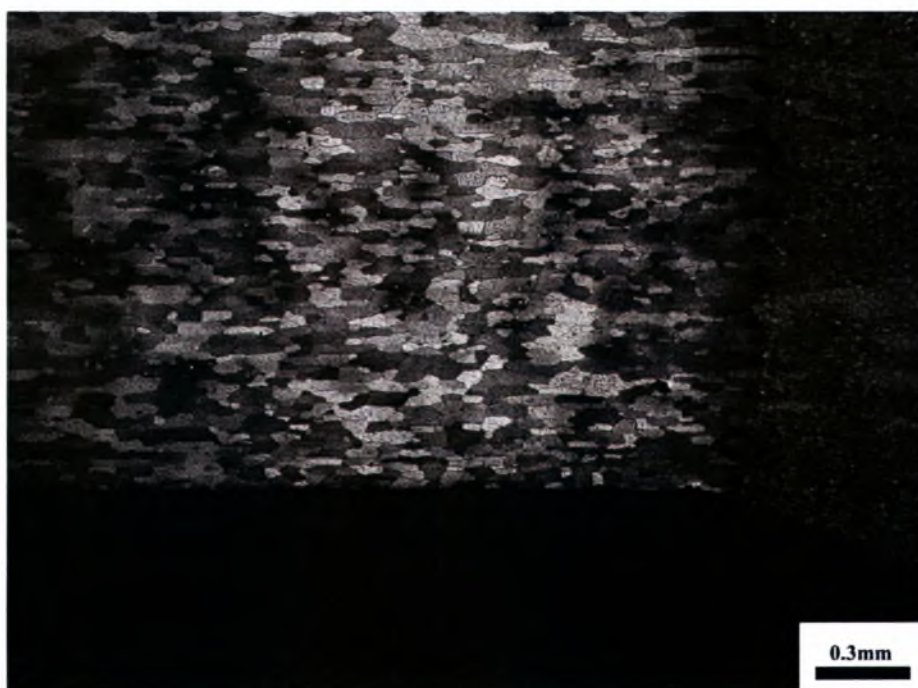
Σχήμα 4.74: Μακρογραφία του δοκιμίου 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).



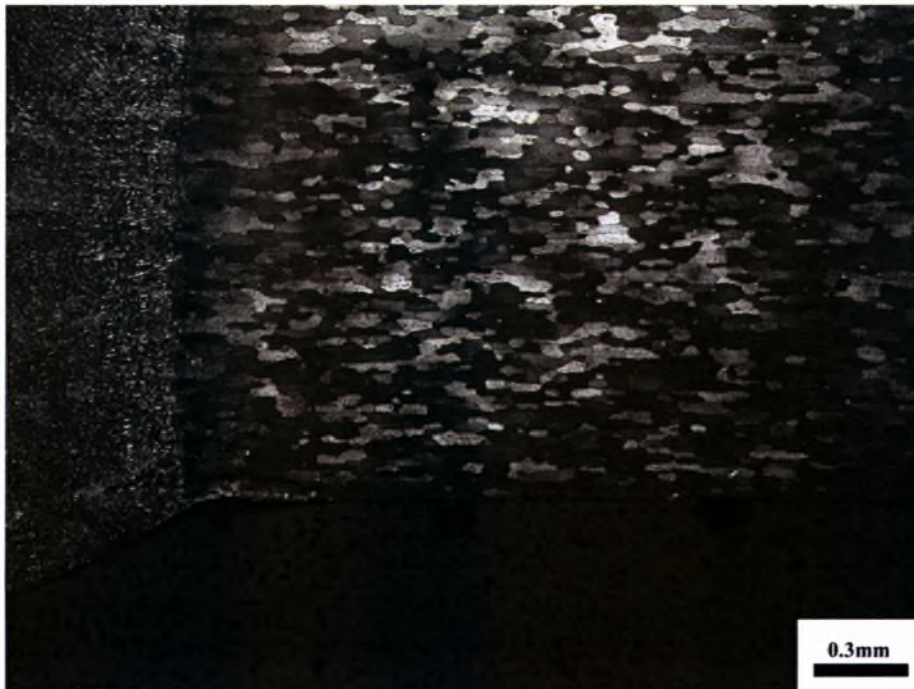
Σχήμα 4.75: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).



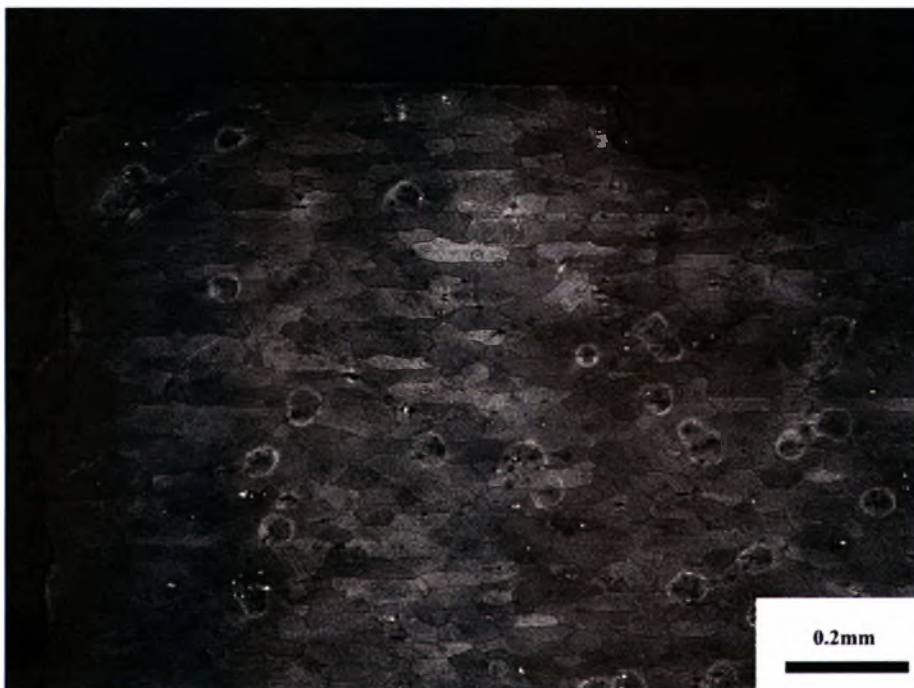
**Σχήμα 4.76: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης
στο δοκίμιο 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).**



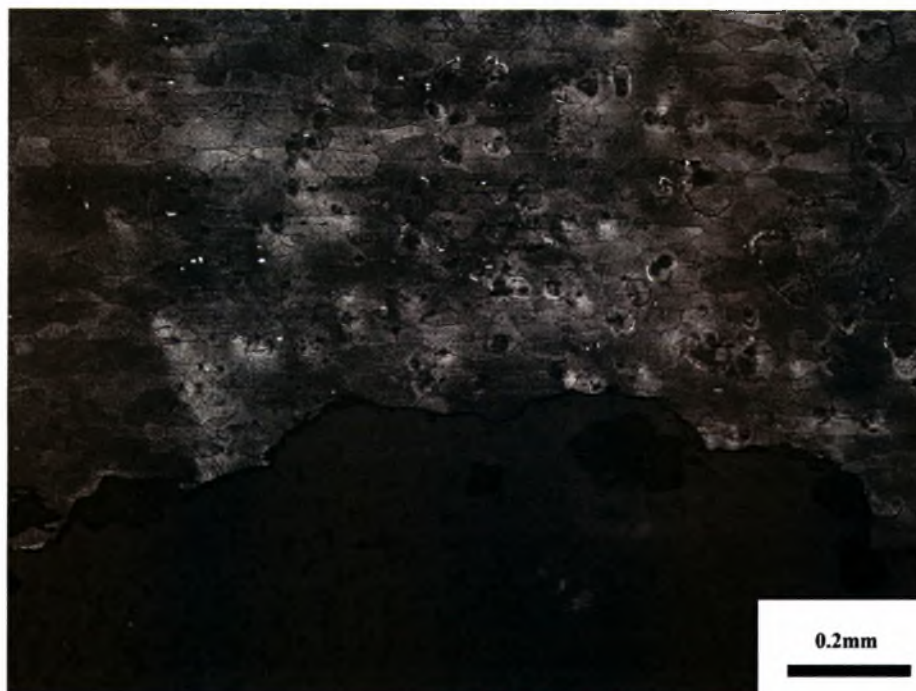
**Σχήμα 4.77: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης
στο δοκίμιο 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).**



Σχήμα 4.78: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).

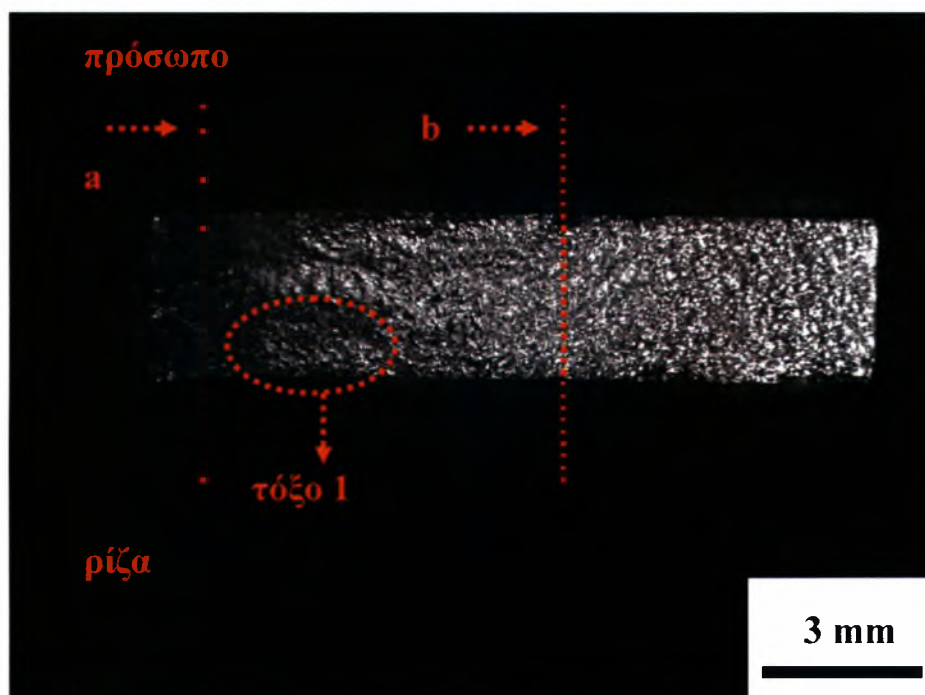


Σχήμα 4.79: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 9a ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).

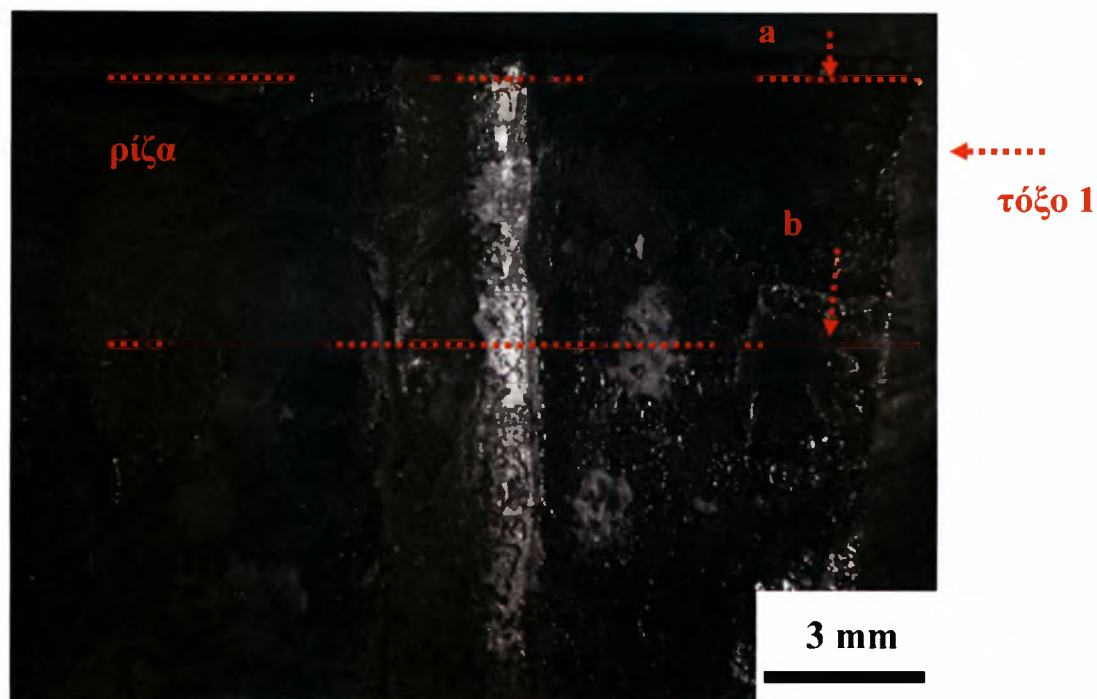


Σχήμα 4.80: Έντονη διάβρωση μακριά από τη ρίζα της συγκόλληση στο δοκίμιο 9b ($\sigma_{\max} = 75$, $N_f = 182.304$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 10 υπάρχει ένα τόξο ύψους 2,29mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 10 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.81 και 4.82.

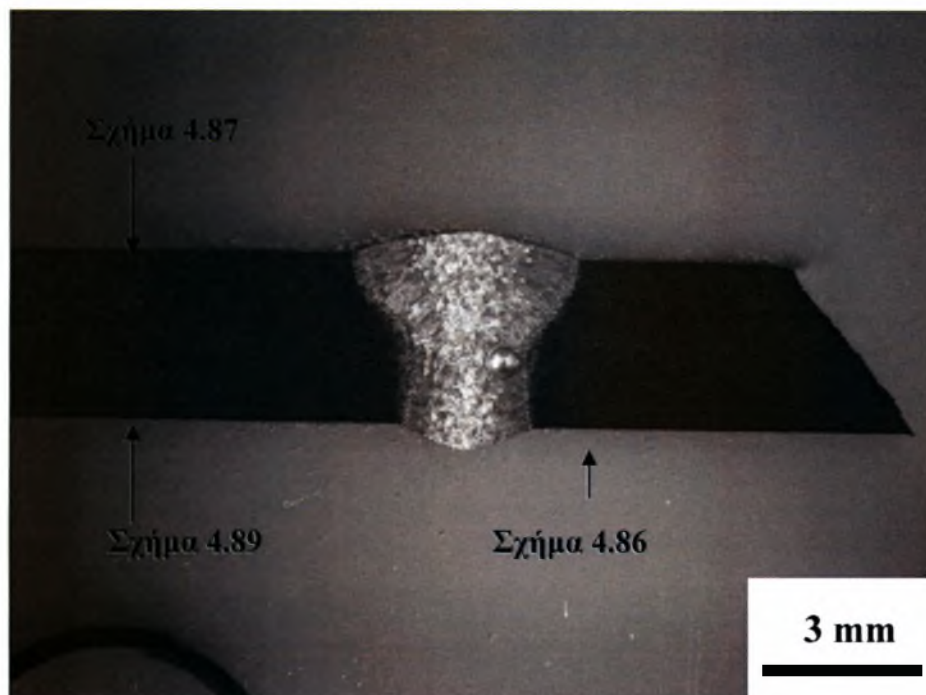


Σχήμα 4.81: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 10 ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).

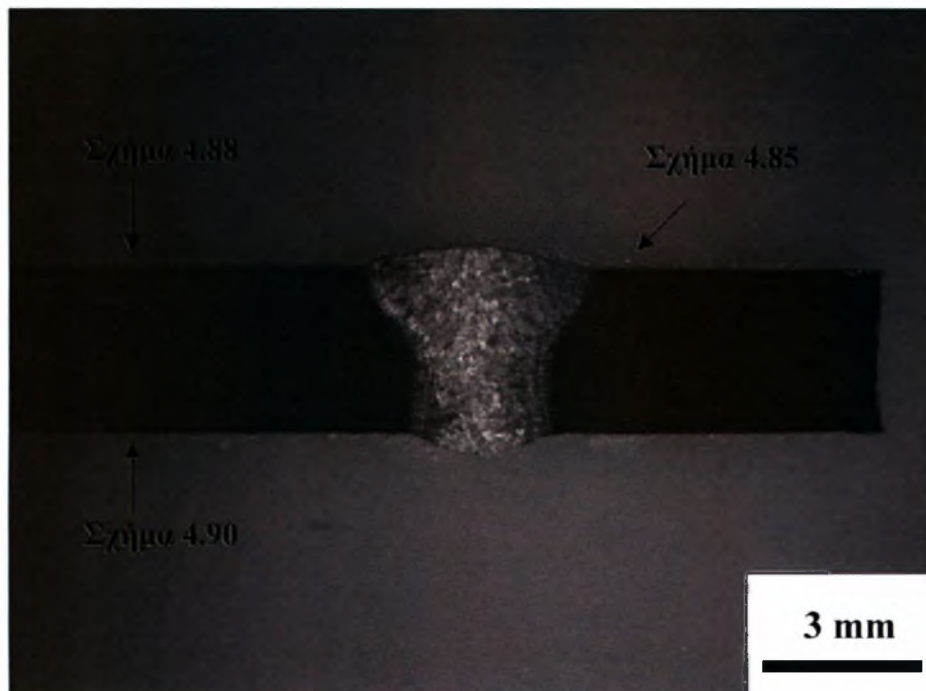


Σχήμα 4.82: Επιλογή τομής a – b του δοκιμίου 10 ($\sigma_{max} = 100$, $N_f = 360.266$).

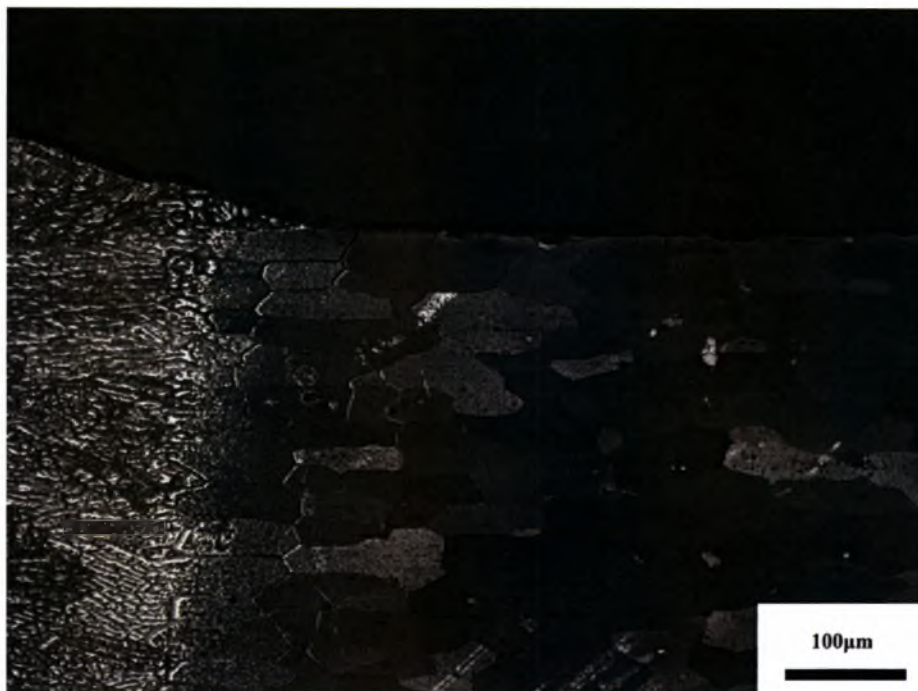
Στα σχήματα 4.83 και 4.84 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 10, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Παρατηρήθηκε ότι η περιοχή της συγκόλλησης εμφανίζεται ανθεκτικότερη από το μέταλλο βάσης και τη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και δεν παρουσιάζει καθόλου διάβρωση. Στο σχήμα 4.85 φαίνεται η αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης, ενώ στο σχήμα 4.86 κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης. Τα πρώτα τμήματα διάβρωσης εμφανίζονται σε απόσταση περίπου 5mm από το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης. Οι ρωγμές κόπωσης αναπτύσσονται στον πυθμένα των τρημάτων αυτών όπως διαπιστώνεται από την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο. Στα σχήματα 4.87 και 4.88 παρατηρείται η έντονη αυτή διάβρωση που εμφανίζεται μακριά από τη συγκόλληση στο πρόσωπο, ενώ στα σχήματα 4.89 και 4.90 στη ρίζα της συγκόλλησης. Η διάβρωση εμφανίζεται εντονότερα στην επιφάνεια της ρίζας παρά στην επιφάνεια του προσώπου.



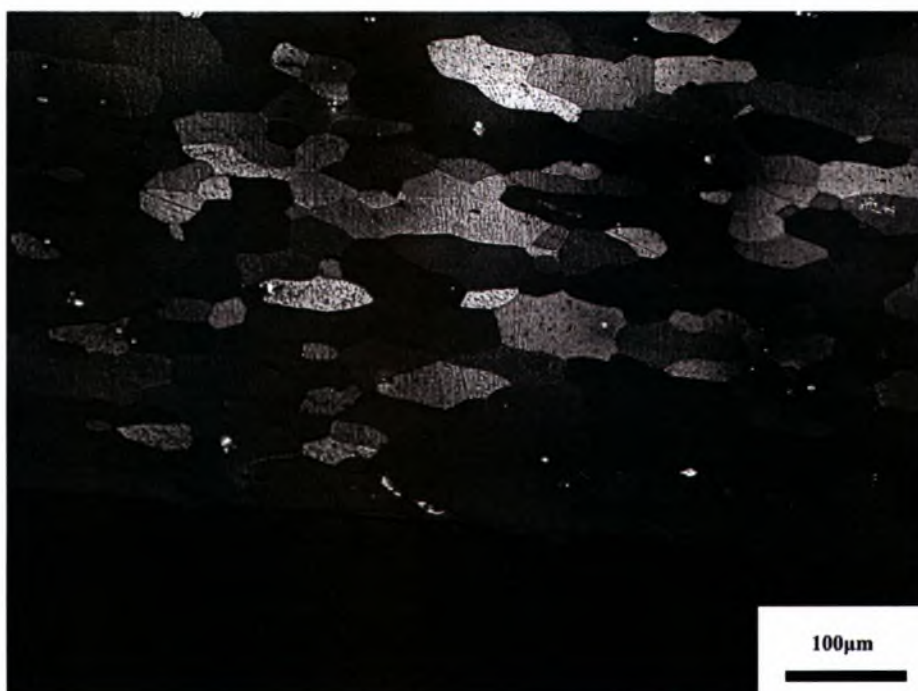
Σχήμα 4.83: Μακρογραφία του δοκιμίου 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).



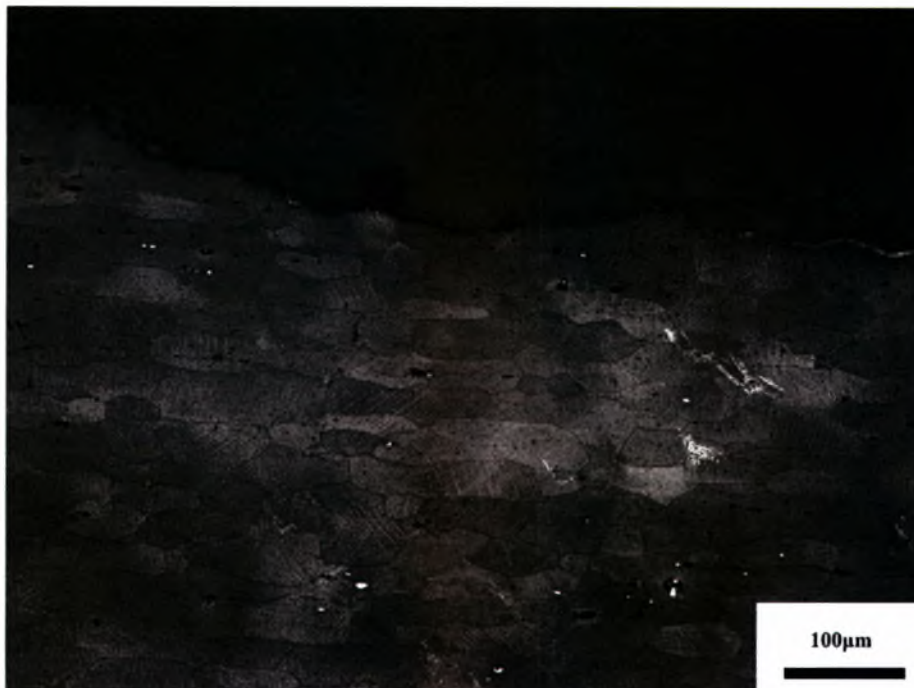
Σχήμα 4.84: Μακρογραφία του δοκιμίου 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).



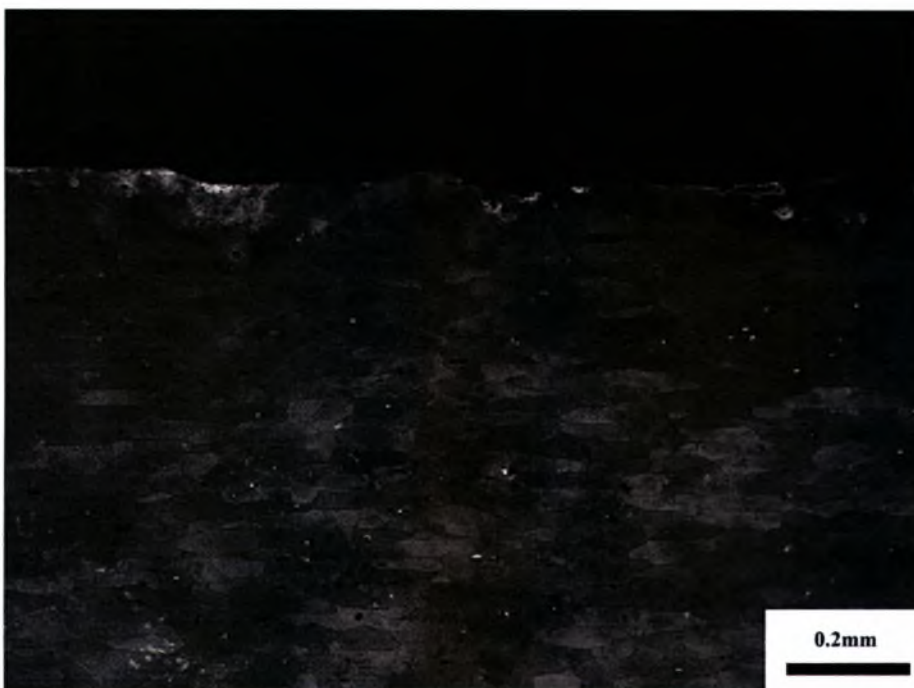
Σχήμα 4.85: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).



Σχήμα 4.86: Αδιάβρωτη επιφάνεια κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).



Σχήμα 4.87: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλληση στο δοκίμιο 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).



Σχήμα 4.88: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλληση στο δοκίμιο 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).

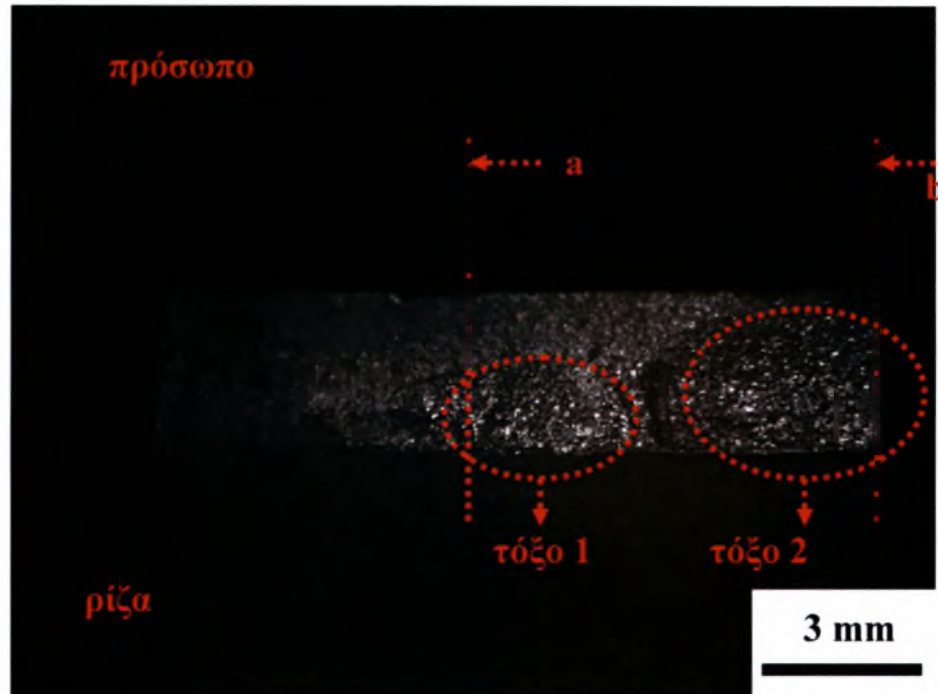


Σχήμα 4.89: Έντονη διάβρωση μακριά από τη ρίζα της συγκόλληση στο δοκίμιο 10a ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).



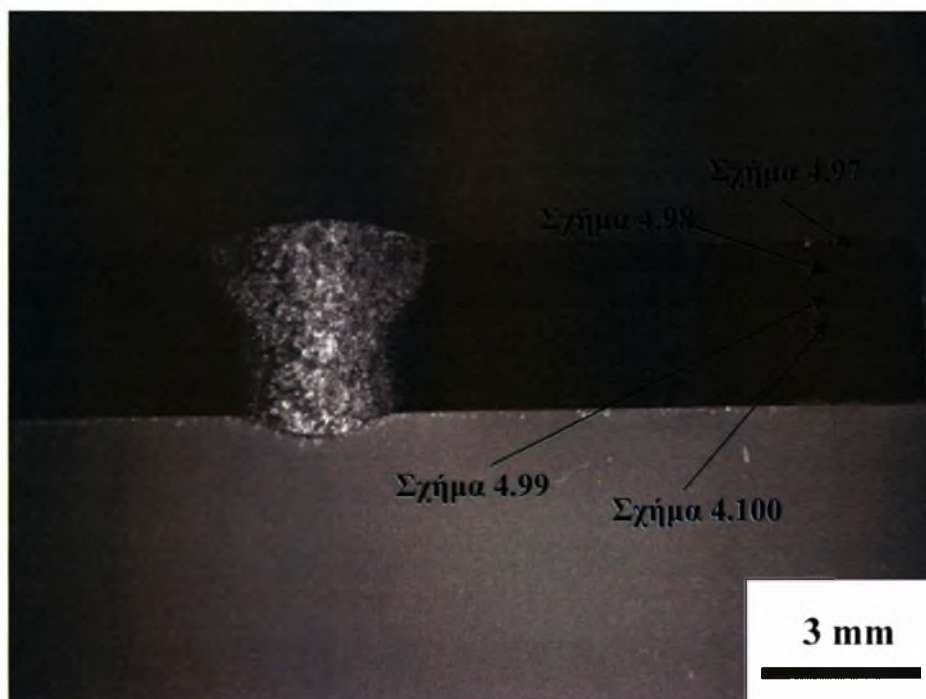
Σχήμα 4.90: Έντονη διάβρωση μακριά από τη ρίζα της συγκόλληση στο δοκίμιο 10b ($\sigma_{\max} = 100$, $N_f = 360.266$).

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 12 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο έχει ύψος 1,7mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 2,7mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 12 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.91.

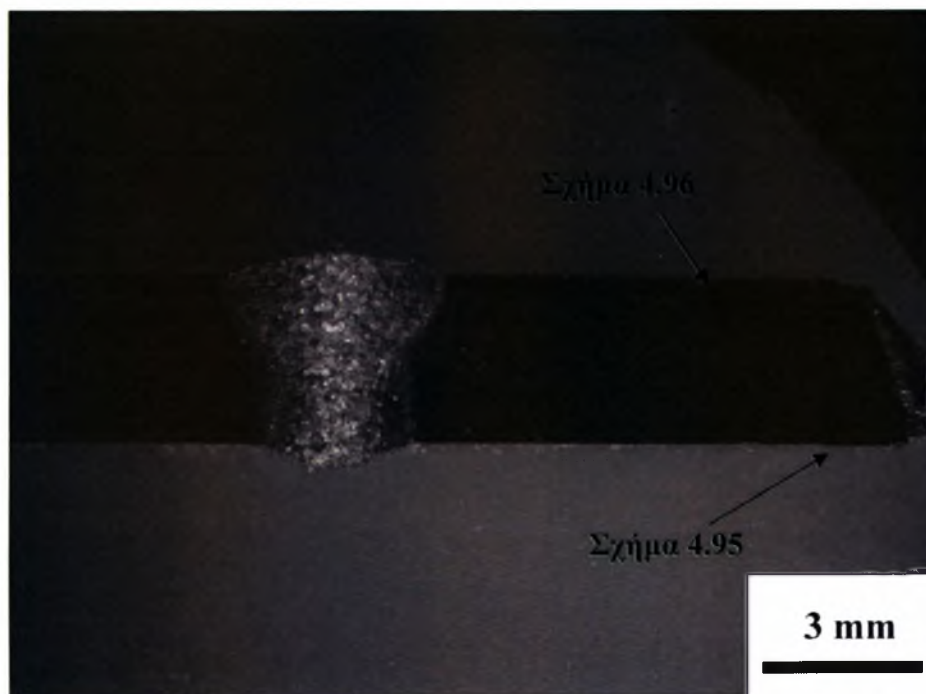


Σχήμα 4.91: Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 12 ($\sigma_{max} = 150$, $N_f = 115.779$).

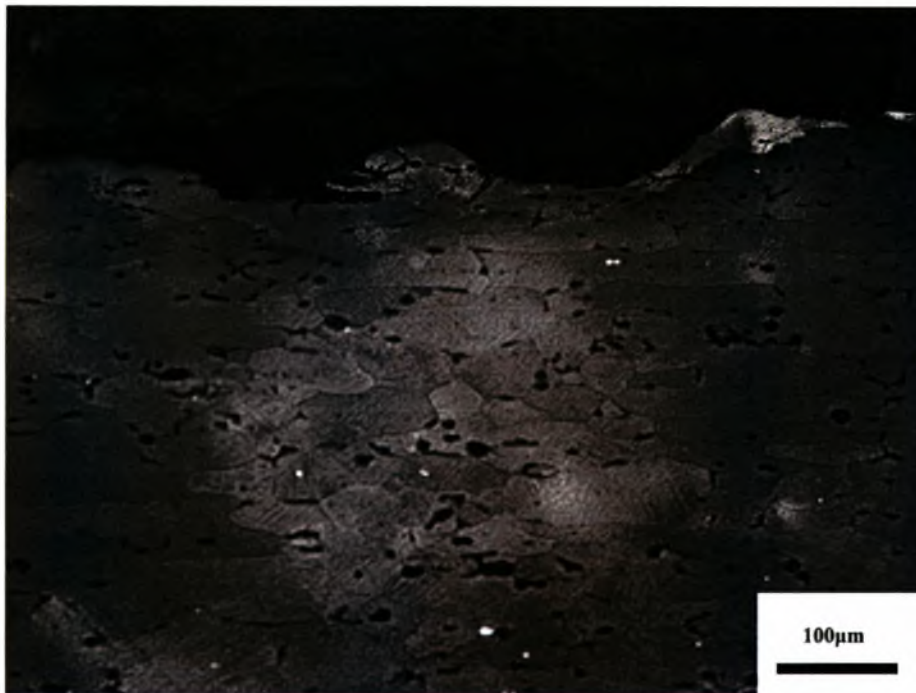
Στα σχήματα 4.92 και 4.93 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 12, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Παρατηρήθηκε ότι η περιοχή της συγκόλλησης εμφανίζεται ανθεκτικότερη από το μέταλλο βάσης και τη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και δεν παρουσιάζει καθόλου διάβρωση. Τα πρώτα τρήματα διάβρωσης εμφανίζονται σε απόσταση περίπου 5mm από το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης. Στο σχήμα 4.94 παρουσιάζεται έντονη διάβρωση η οποία εμφανίζεται μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης. Στο σχήμα 4.95 γίνεται εμφανές ότι η διάβρωση έχει περικρυσταλλικό χαρακτήρα. Από το σχήμα 4.96 φαίνεται ότι η εκκίνηση των τόξων εμφανίζεται στο σημείο όπου παρουσιάζεται έντονη τρημματική διάβρωση. Γενικότερα η επιφάνεια της ρίζας είναι αρκετά καθαρή από την διάβρωση, παρ' όλο που το δοκίμιο έσπασε από τη ρίζα. Η επιφάνεια του προσώπου της συγκόλλησης παρουσιάζει μεγαλύτερη διάβρωση. Ακόμη, όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.97 και 4.98 εμφανίζεται και μία ρωγμή στο πρόσωπο του δοκιμίου. Η ρωγμή αυτή είναι διακρυσταλλική, όπως προκύπτει από τα σχήματα 4.99 και 4.100.



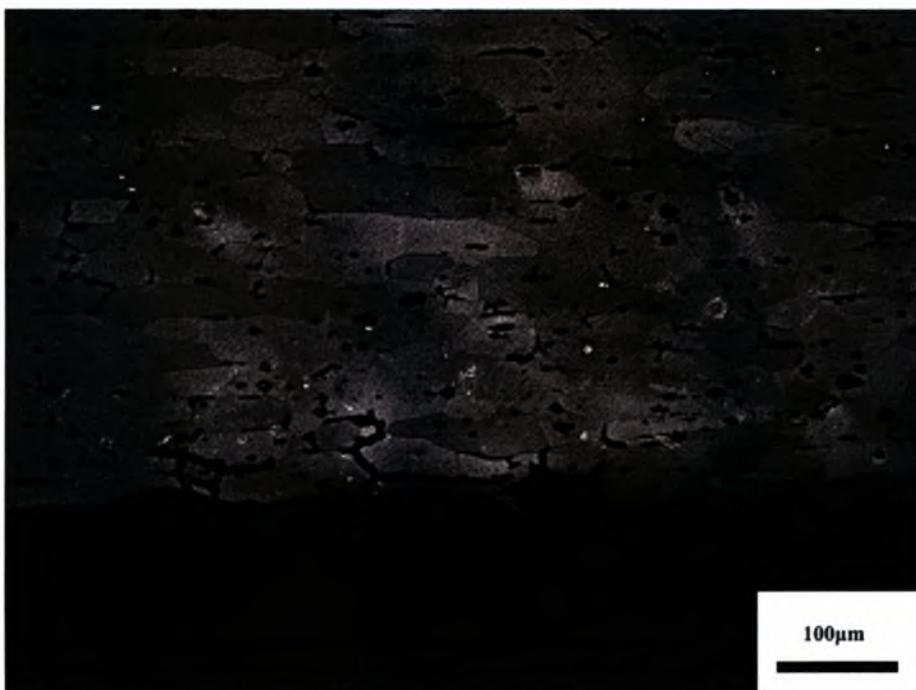
Σχήμα 4.92: Μακρογραφία του δοκιμίου 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



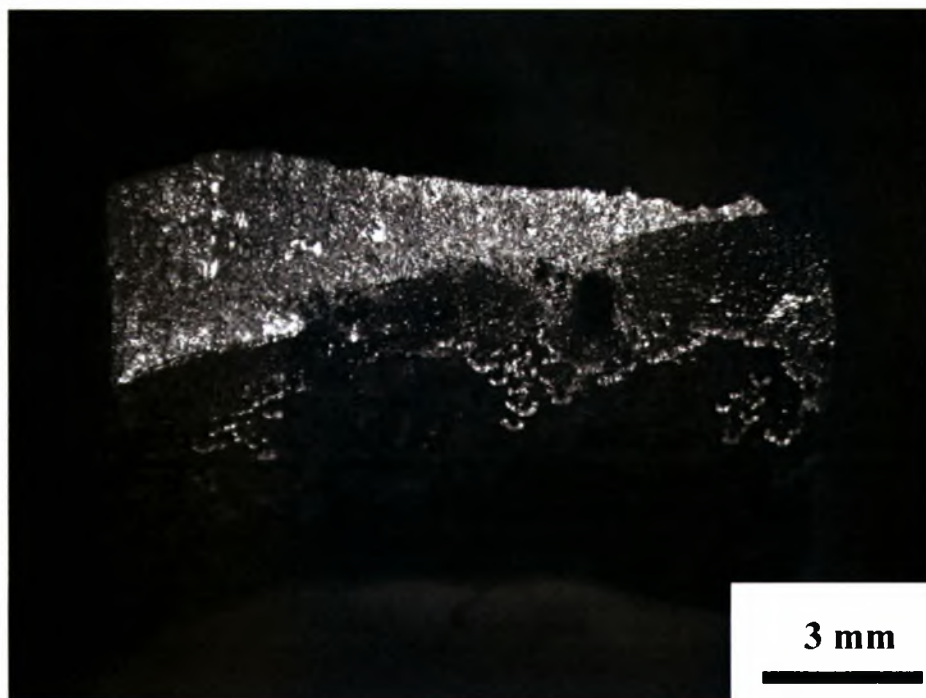
Σχήμα 4.93: Μακρογραφία του δοκιμίου 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



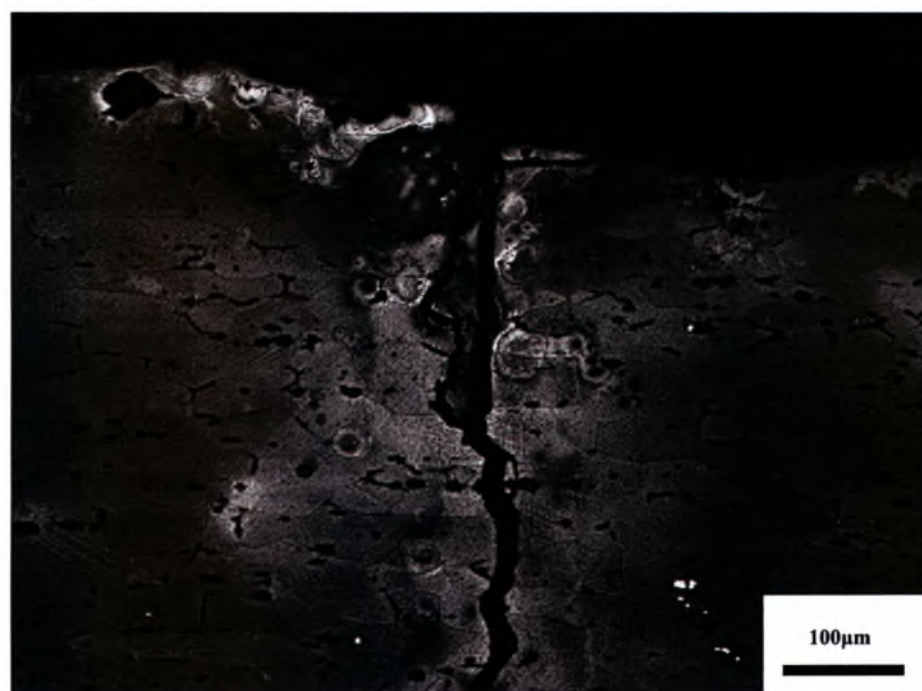
Σχήμα 4.94: Έντονη διάβρωση μακριά από το πρόσωπο της συγκόλληση στο δοκίμιο 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



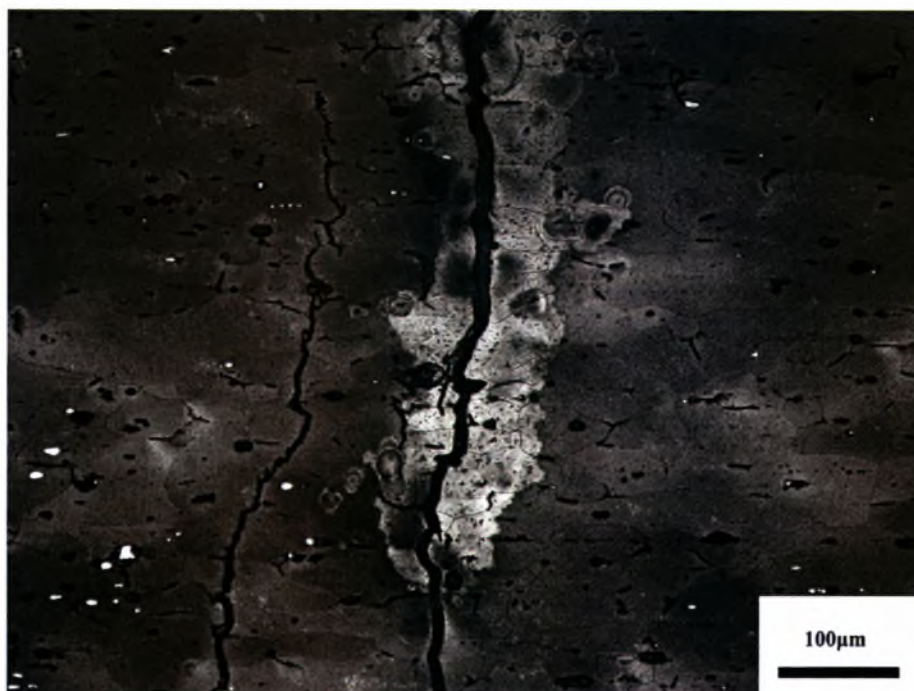
Σχήμα 4.95: Περικρυσταλλική διάβρωση στο δοκίμιο 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



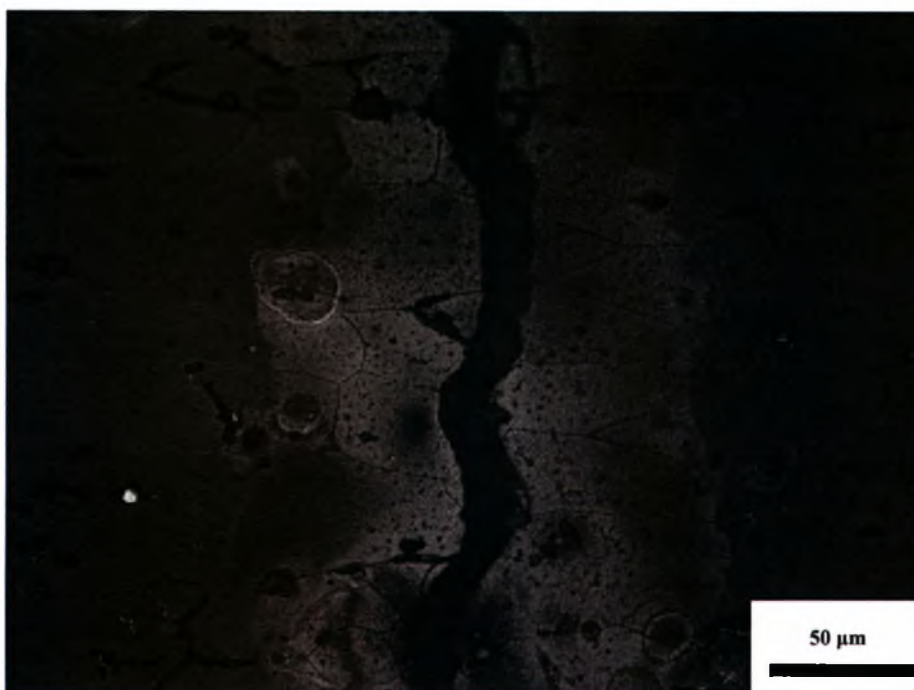
Σχήμα 4.96: Εκκίνηση τόξων στο σημείο όπου παρουσιάζεται έντονη τρημματική διάβρωση στο δοκίμιο 12b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



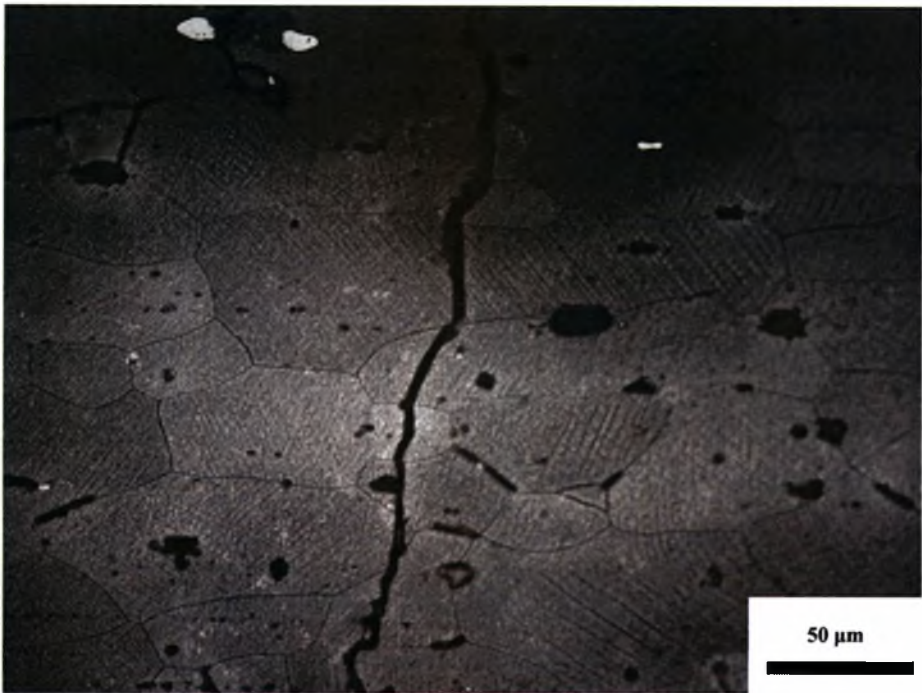
Σχήμα 4.97: Εκκίνηση ρωγμής στο πρόσωπο του δοκιμίου 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



Σχήμα 4.98: Διάδοση ρωγμής στο δοκίμιο 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



Σχήμα 4.99: Διακρυσταλλική ρωγμή στο δοκίμιο 12a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 115.779$).



Σχήμα 4.100: Διακρυσταλλική ρωγμή στο δοκίμιο 12a ($\sigma_{max} = 150$, $N_f = 115.779$).

Όπως στα αδιάβρωτα, έτσι και στα διαβρωμένα υπολογίστηκαν, με τον ίδιο τρόπο, κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας θραύσης αλλά και της ενίσχυσης για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις παρουσιάζονται στους πίνακες 4.101 και 4.102. Το ύψος της ενίσχυσης είναι κατά μέσο όρο 0.45mm τόσο στο πρόσωπο όσο και στη ρίζα ενώ σχηματίζει γωνία περίπου 180° με το μέταλλο βάσης.

Πίνακας 4.101: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόξων κόπωσης.

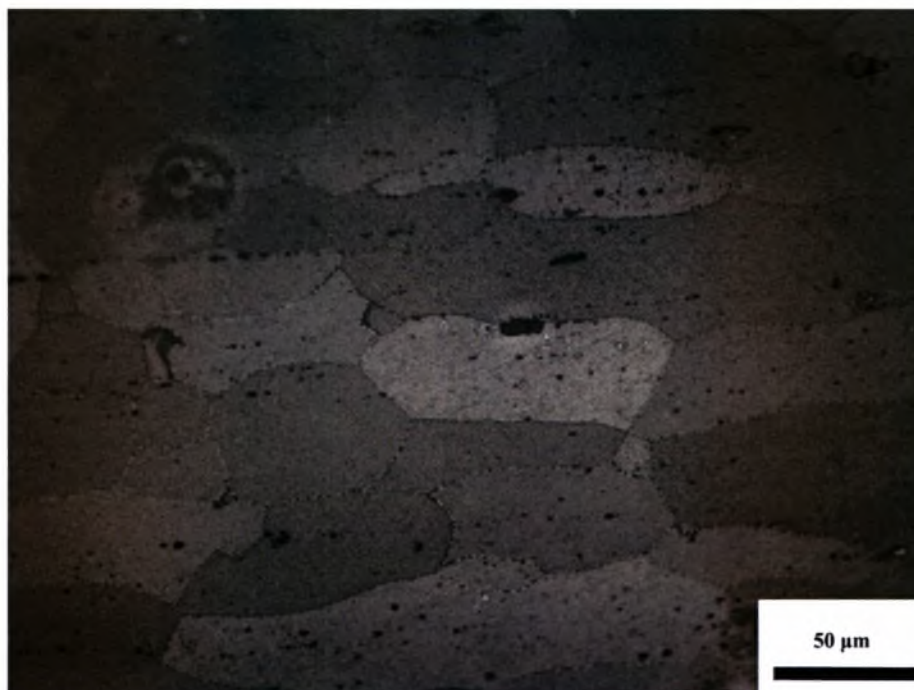
2139 – T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΑ		
Δοκίμιο	Ύψος τόξου 1 (mm)	Ύψος τόξου 2 (mm)
9	2,29	-
10	2,29	-
12	1,7	2,7

Πίνακας 4.102: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης.

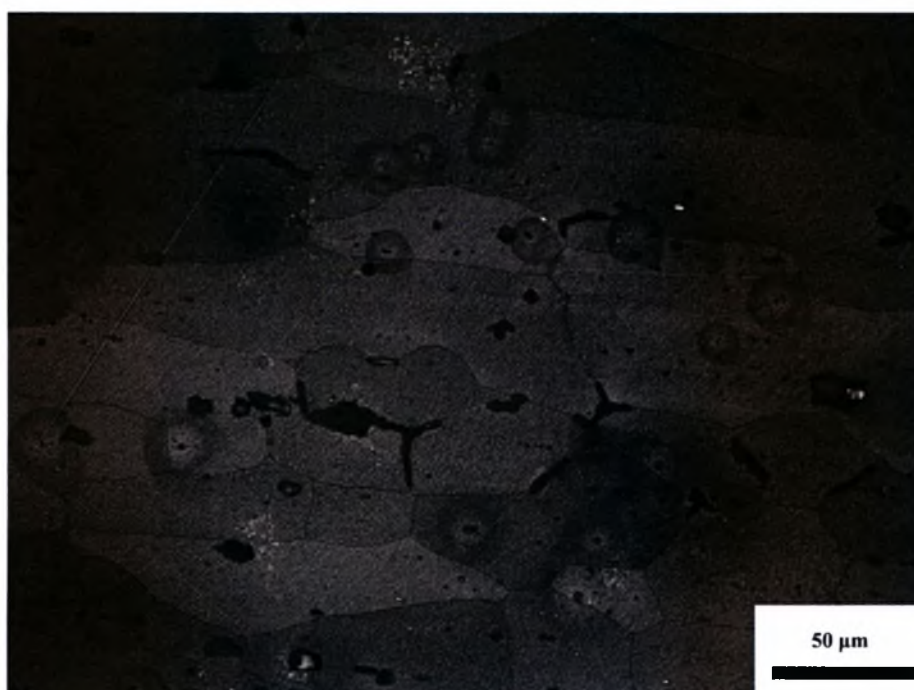
2139 – T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΑ				
Δοκίμιο	Κλίση ενίσχυσης στην επιφάνεια	Κλίση ενίσχυσης στη ρίζα	Ύψος ενίσχυσης στην επιφάνεια (mm)	Ύψος ενίσχυσης στη ρίζα (mm)
9	183°	197°	0.5	0.43
10	162°	195°	0.43	0.43
12	190°	172°	0.43	0.5

Γενικά η περιοχή της συγκόλλησης και στα τρία αυτά δοκίμια εμφανίζεται ανθεκτικότερη από το μέταλλο βάσης και τη ΘΕΖ και δεν παρουσιάζει καθόλου διάβρωση. Τα πρώτα τμήματα διάβρωσης εμφανίζονται σε απόσταση περίπου 5 mm από το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης. Οι ρωγμές κόπωσης αναπτύσσονται στον πυθμένα των τρημάτων αυτών όπως διαπιστώνεται από την παρατήρηση στο στερεοσκόπιο και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η διάβρωση έχει περικρυσταλλικά χαρακτηριστικά ως προς τα σημεία έναρξης και διάδοσης των ρωγμών κόπωσης.

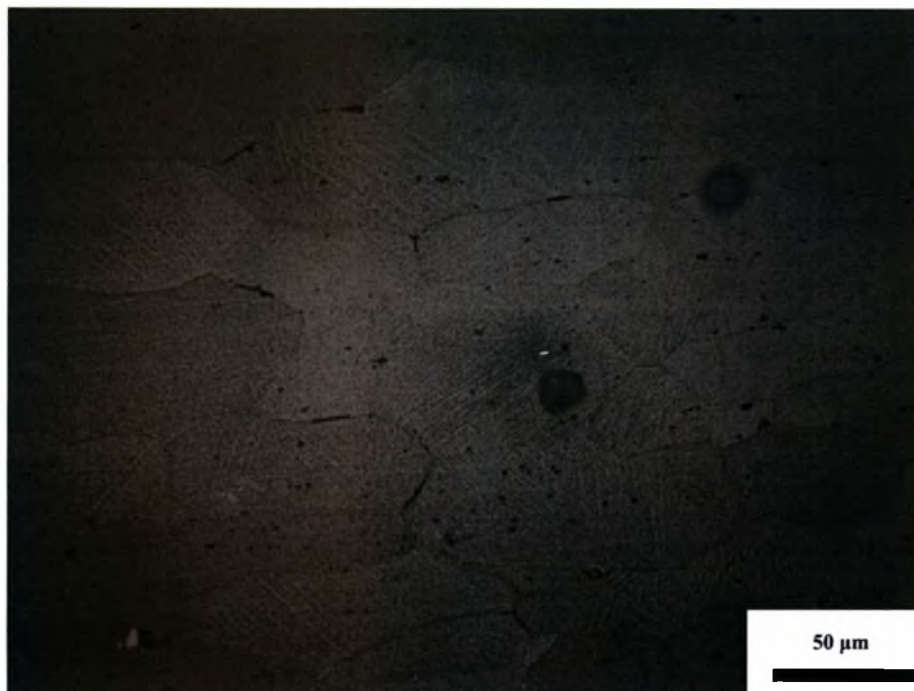
Η μικροδομή του κράματος φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά αυτή λόγω έντονης παρουσίας φάσεων που αναπτύσσονται στα όρια των κόκκων του υλικού κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης εξαιτίας των φαινομένων της διαλυτοποίησης και διεύρυνσης των φάσεων ισχυροποίησης. Στο σχήμα 4.103 παρουσιάζεται η μικροδομή στη ΘΕΖ. Παρατηρείται το φαινόμενο της διαλυτοποίησης σε απόσταση 2mm από τη συγκόλληση. Στο σχήμα 4.104 παρουσιάζεται η μικροδομή στη ΘΕΖ σε απόσταση 4mm από τη συγκόλληση. Εκεί παρατηρείται το φαινόμενο της διεύρυνσης. Τέλος, στο σχήμα 4.105 παρουσιάζεται η μικροδομή στο βασικό μέταλλο.



Σχήμα 4.103: Μικροδομή ΘΕΖ – διαλυτοποίηση 2mm από τη συγκόλληση.



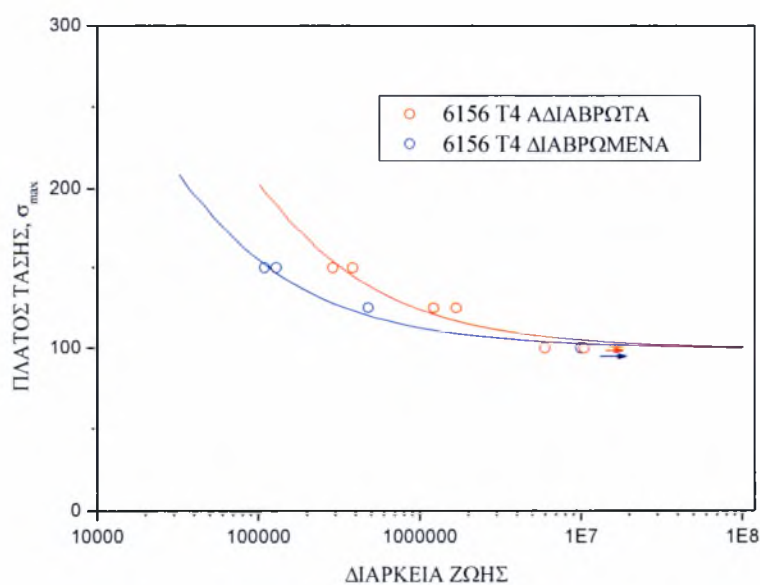
Σχήμα 4.104: Μικροδομή ΘΕΖ – διεύρυνση 4mm από τη συγκόλληση.



Σχήμα 4.105: Μικροδομή βασικού μετάλλου.

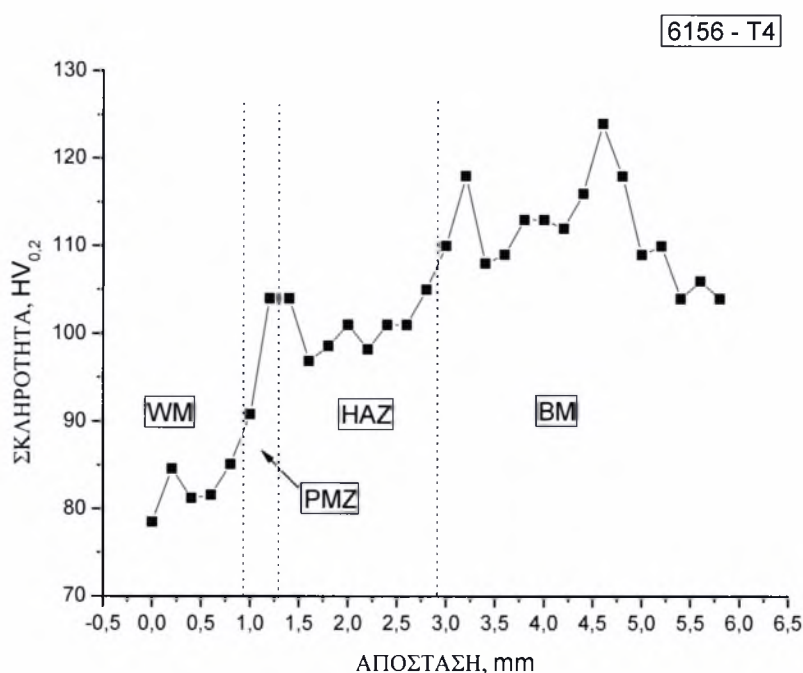
4.3 Κράμα 6156-T4

Στο διάγραμμα 4.106 παρουσιάζονται οι καμπύλες Wohler του κράματος 6156 – T4. Το όριο διαρκούς αντοχής στα μη διαβρωμένα είναι 110 MPa, ενώ στα διαβρωμένα 100 MPa. Επομένως στα διαβρωμένα είναι μειωμένο κατά 10 MPa.



Διάγραμμα 4.106: Καμπύλες Wohler του κράματος 6156 – T4.

Στο διάγραμμα 4.107 παρουσιάζεται το προφίλ μικροσκληρομέτρησης που έγινε στο κράμα 6156-T4. Παρατηρούμε, όπως και στο κράμα 2139-T3 και 2139-T8, μεταβολές των τιμών όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της συγκόλλησης. Η σκληρότητα στην λίμνη συγκόλλησης είναι 83 HV, στην ζώνη μερικής τήξης 95 HV, στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη 100 HV και στο βασικό μέταλλο 110 HV.

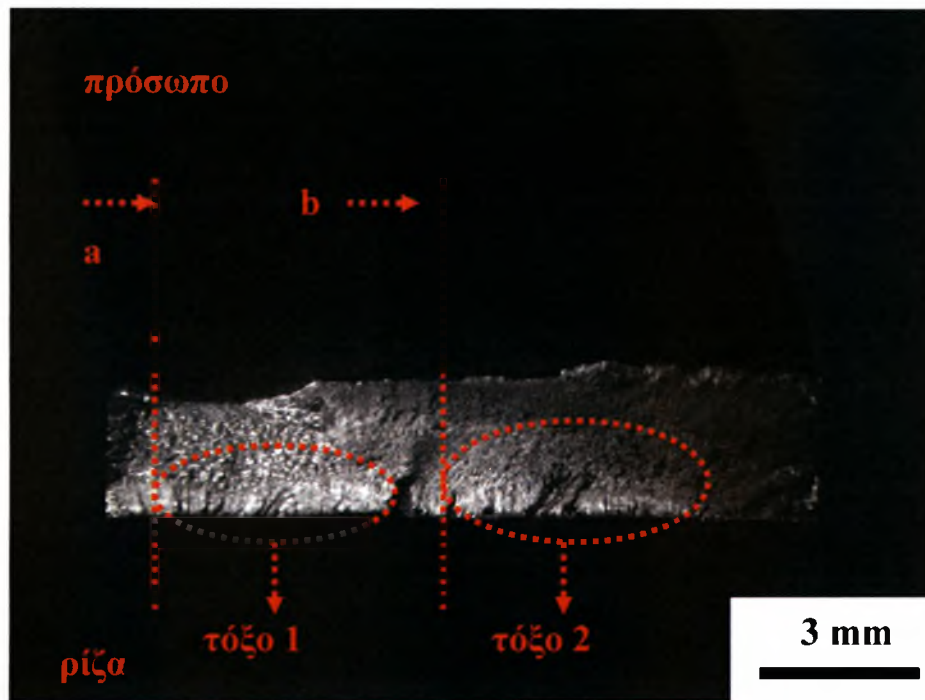


Διάγραμμα 4.107: Προφίλ μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 6156-T4.

4.3.1 Αδιάβρωτα δοκίμια

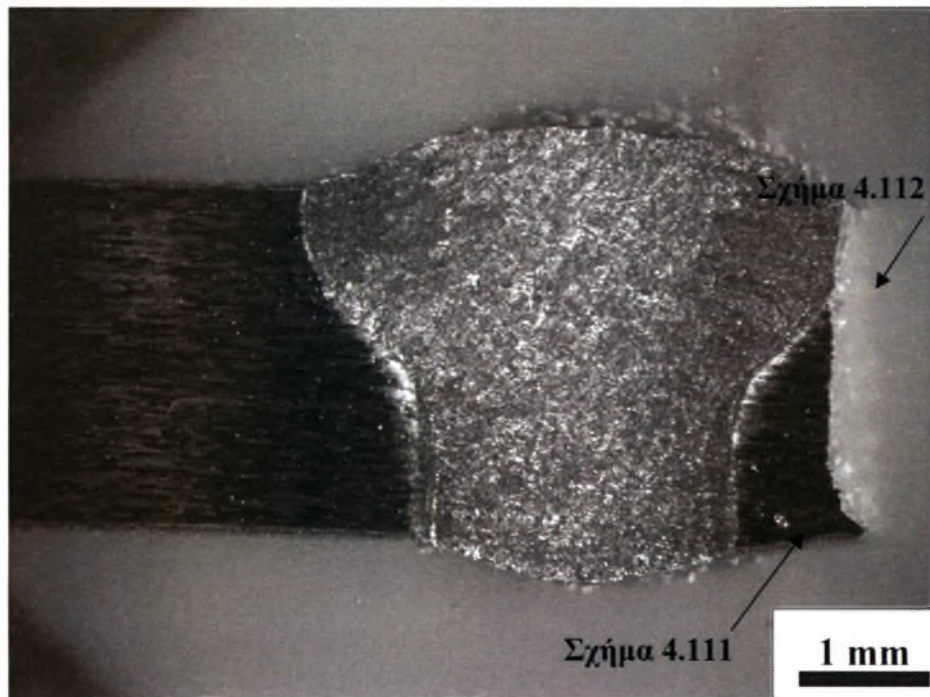
Στην επιφάνεια των δοκιμίων του κράματος 6156 – T4 εμφανίζεται clad layer το οποίο βοηθάει στην αντίσταση της διάβρωσης. Για την μελέτη του υλικού 6156 – T4 χρησιμοποιήθηκε ένα αδιάβρωτο δοκίμιο. Το δοκίμιο αυτό είναι το 20 όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.6. Στο δοκίμιο αυτό έγινε η κατάλληλη προετοιμασία για την μελέτη του στο στερεοσκόπιο και στο μικροσκόπιο. Η θέση θραύσης του δοκιμίου ήταν στην περιοχή της συγκόλλησης. Είναι γνωστό ότι τα κέντρα των τόξων που εμφανίζονται στην επιφάνεια θραύσης είναι σημεία έναρξης ρωγμών. Για το λόγο αυτό μελετήσαμε στο στερεοσκόπιο την επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου.

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 20 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο έχει ύψος 1,43mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 1,85mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 20 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.108, ακριβώς στο κέντρο της περιοχής κόπωσης.

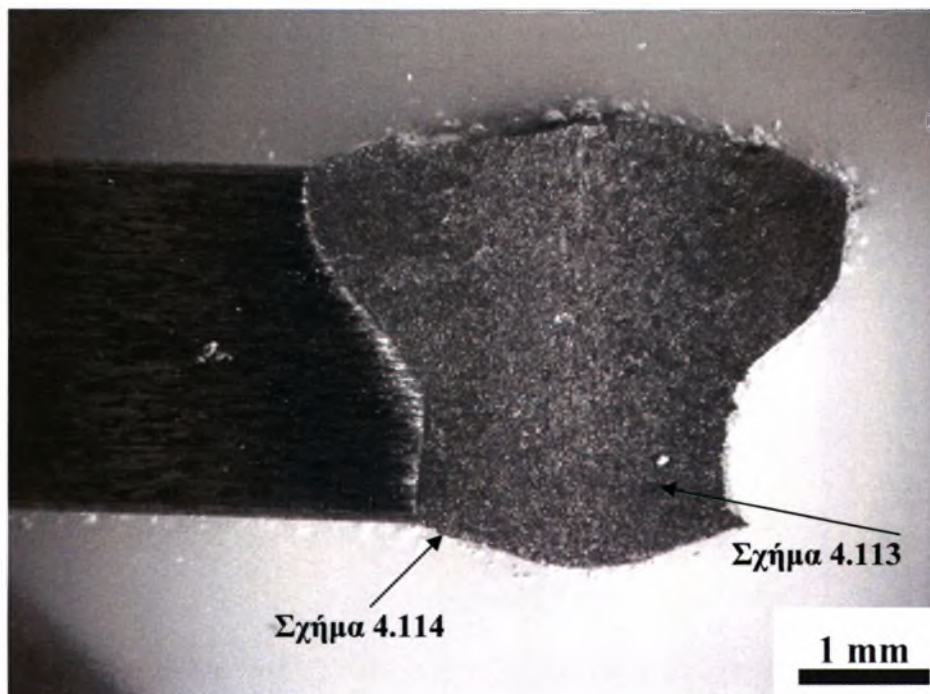


Σχήμα 4.108: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 20 ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).

Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.109 και 4.110 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 20, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.111 και 4.112. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.113 δεν υπάρχουν πόροι τόσο στη ρίζα όσο και στο κέντρο της συγκόλλησης. Εκτός από την κύρια ρωγμή που οδήγησε το δοκίμιο σε αστοχία εντοπίστηκε και δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης που αναπτύσσονταν παράλληλα ακριβώς στην ίδια περιοχή. Η ρωγμή αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.114 Στο σχήμα αυτό φαίνεται επίσης το clad layer.



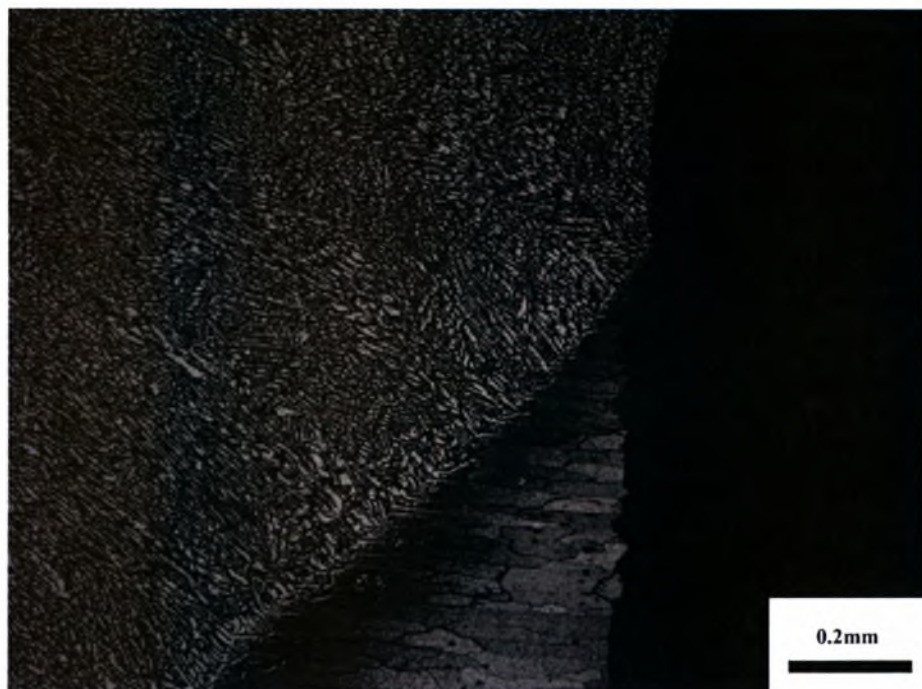
Σχήμα 4.109: Μακρογραφία δοκιμίου 20a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).



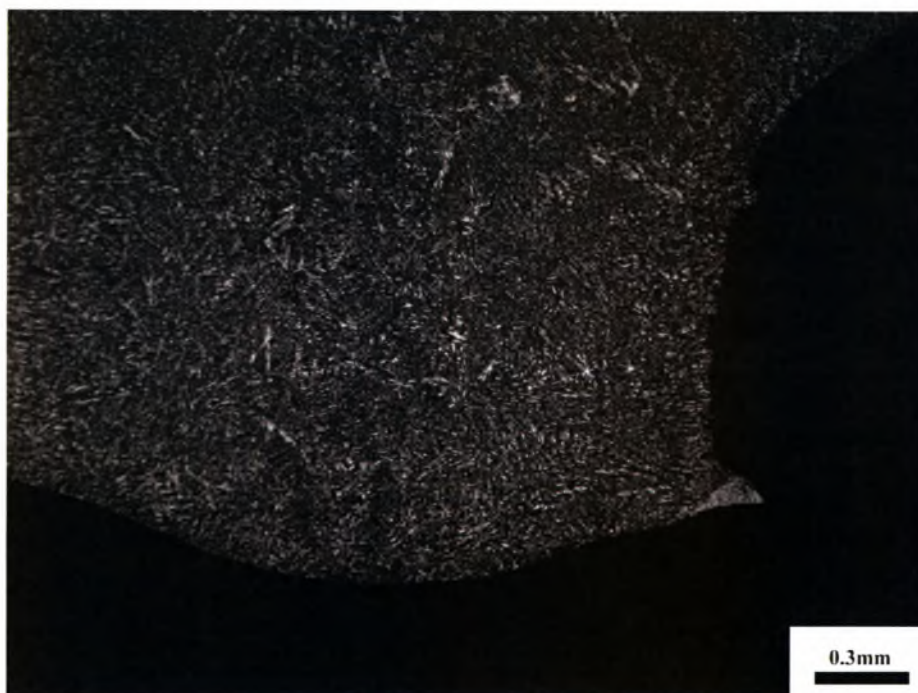
Σχήμα 4.110: Μακρογραφία δοκιμίου 20b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).



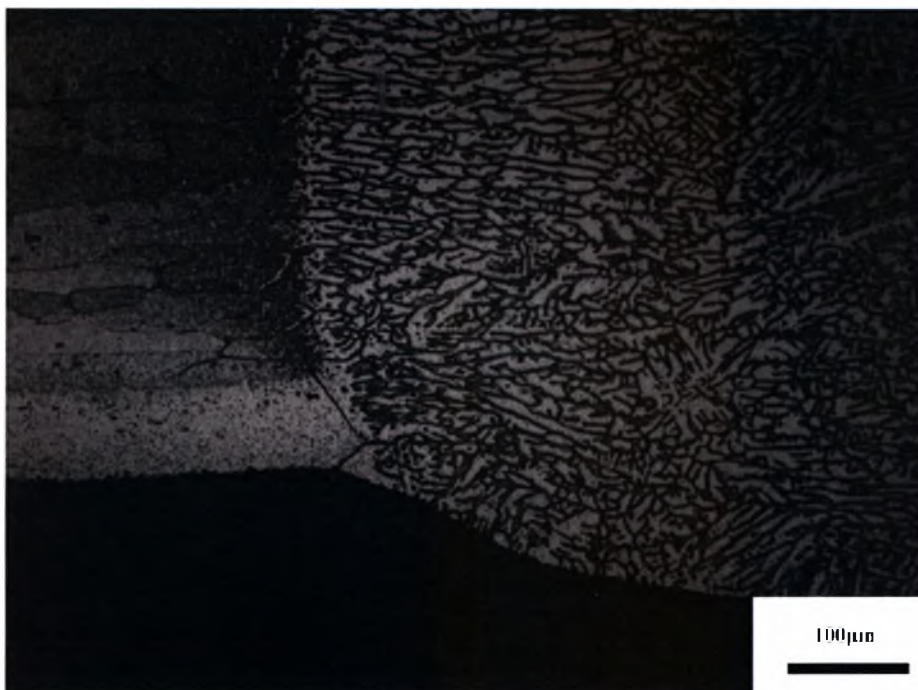
Σχήμα 4.111: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 20a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).



Σχήμα 4.112: Διάδοση ρωγμής κόπωσης στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 20a ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).



Σχήμα 4.113: Μη ύπαρξη πόρων στη ρίζα και στο κέντρο της συγκόλλησης του δοκιμίου 20b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).



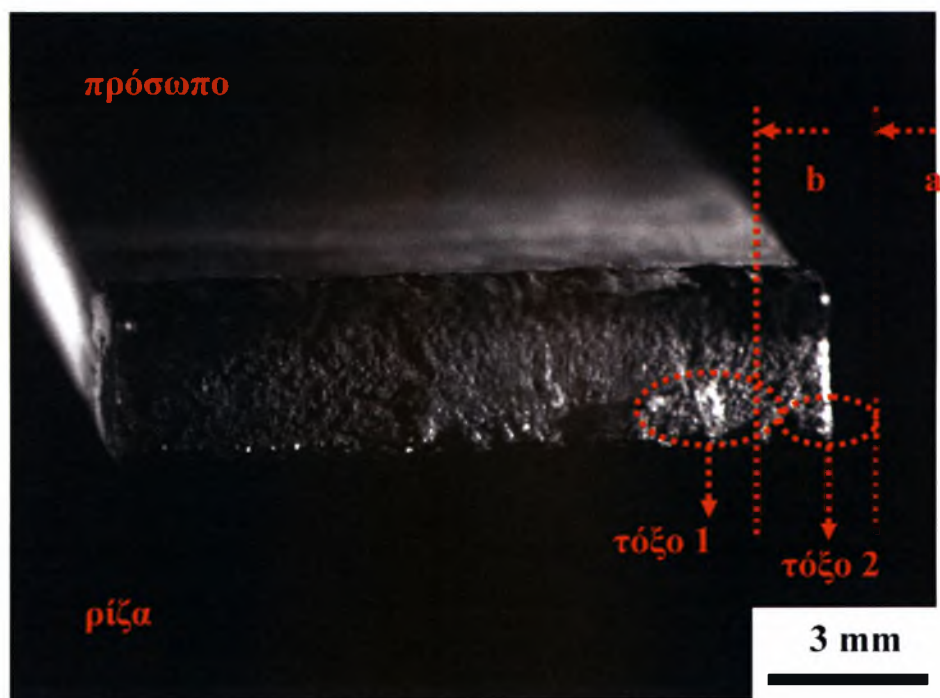
Σχήμα 4.114: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 20b ($\sigma_{\max} = 150$, $N_f = 162.232$).

Η συμπεριφορά της κατηγορίας αυτής των δειγμάτων σε κόπωση είναι αντίστοιχη αυτής των κραμάτων 2139 – T3 και 2139 – T8.

4.3.2 Δοκίμια που είχαν υποστεί αλατονέφωση για διάστημα 30 ημερών

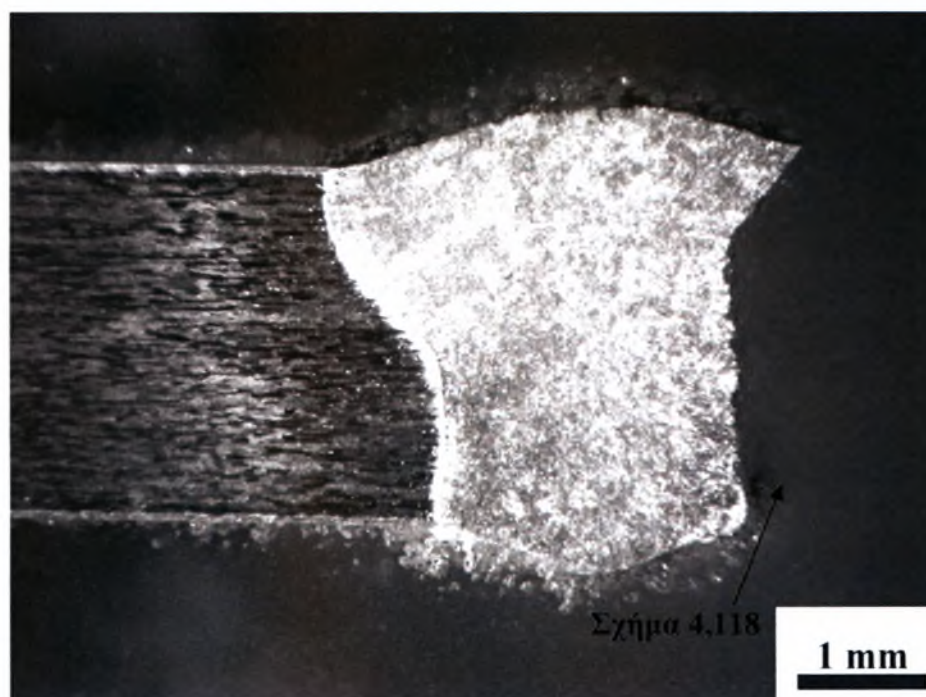
Για την ολοκλήρωση της μελέτης του υλικού 6156 – T4 χρησιμοποιήθηκε άλλο ένα δοκίμιο, το 16. Η διαφορά είναι ότι το δοκίμιο αυτό είναι διαβρωμένο. Ομοίως, έγινε προετοιμασία για τη μελέτη του στο στερεοσκόπιο και στη συνέχεια στο μικροσκόπιο. Η θέση θραύσης του δοκιμίου ήταν στην περιοχή της συγκόλλησης.

Στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 16 υπάρχουν δύο τόξα. Το πρώτο έχει ύψος 1,30mm, ενώ το δεύτερο έχει ύψος 0,80mm. Για την προετοιμασία του δοκιμίου 16 για τη μελέτη του στο μικροσκόπιο επιλέχθηκε η τομή a – b, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.115.

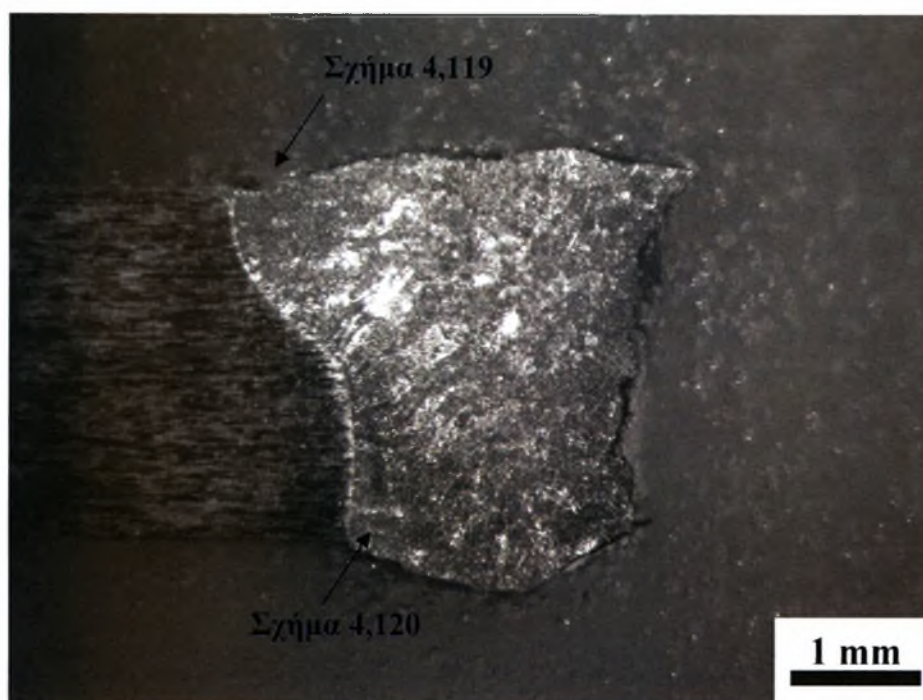


Σχήμα 4.115: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 16 ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).

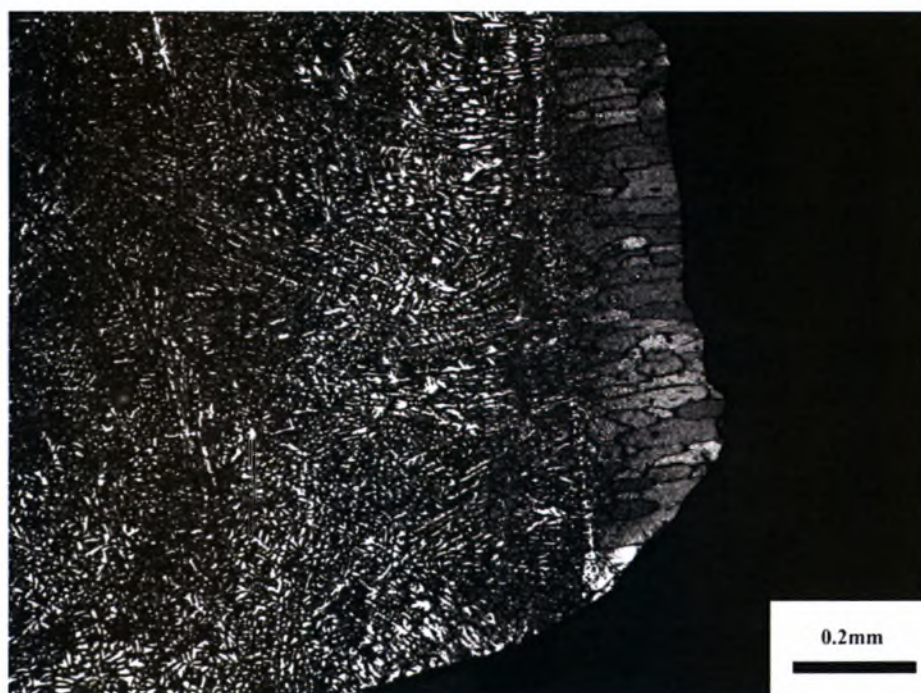
Παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή κόπωσης που αναπτύχθηκε και οδήγησε σε αστοχία έχει σημείο έναρξης στη ZMT στη διεπιφάνεια μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στα σχήματα 4.116 και 4.117 παρουσιάζεται η μακρογραφία της συγκόλλησης του δοκιμίου 16, ώστε να γίνεται αντιληπτό από ποιο σημείο τραβήχτηκε η κάθε φωτογραφία στο μικροσκόπιο. Η διάδοση της ρωγμής στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης γίνεται μέσω του μετάλλου συγκόλλησης, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.118. Στο σχήμα 4.117 παρουσιάζεται έντονη διάβρωση στην περιοχή της συγκόλλησης. Στο βασικό μέταλλο η επιρροή της διάβρωσης είναι πολύ μικρή. Εκτός από την κύρια ρωγμή που οδήγησε το δοκίμιο σε αστοχία εντοπίστηκαν και δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης που αναπτύσσονται παράλληλα ακριβώς στην ίδια περιοχή. Οι ρωγμές αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 4.19 και 4.20. Επίσης στα σχήματα αυτά γίνεται εμφανές και το clad layer.



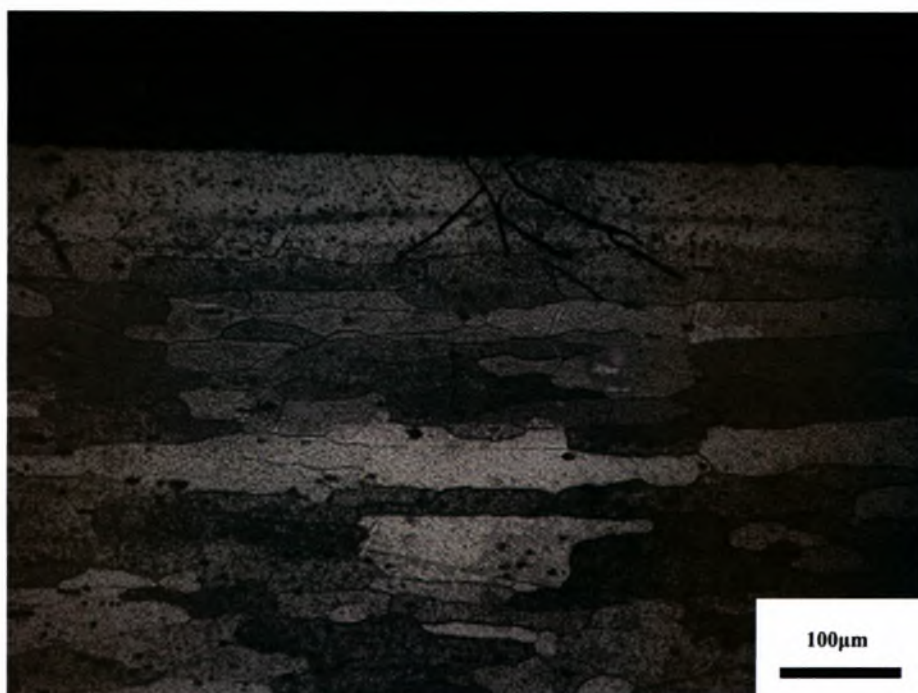
Σχήμα 4.116: Μακρογραφία του δοκιμίου δοκιμίου 16a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).



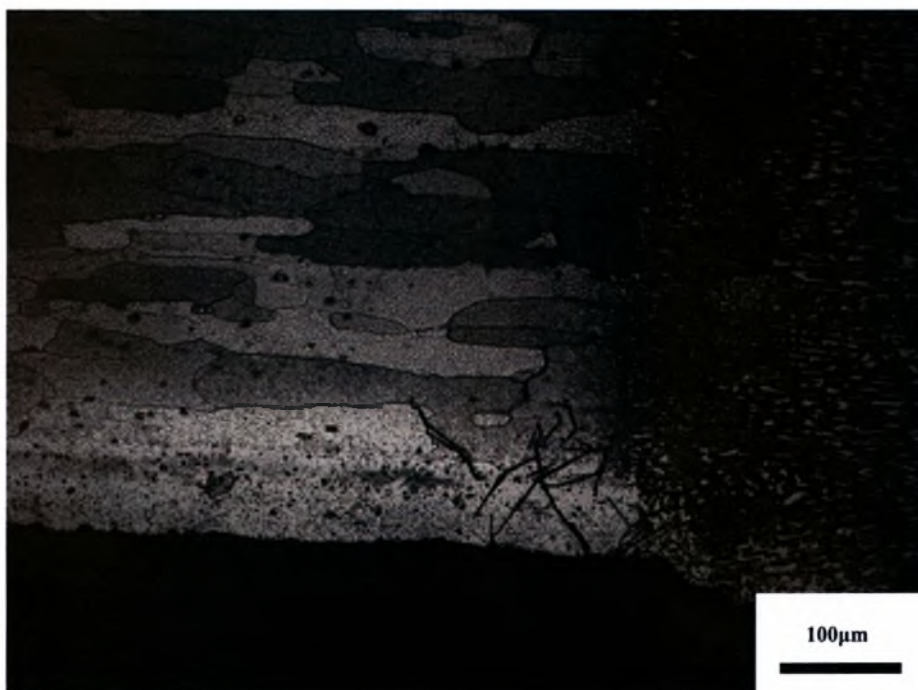
Σχήμα 4.117: Μακρογραφία του δοκιμίου δοκιμίου 16b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).



Σχήμα 4.118: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και διάδοσή της στο μέταλλο συγκόλλησης στο δοκίμιο 16a ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).



Σχήμα 4.119: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στο πρόσωπο της συγκόλλησης στο δοκίμιο 16b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).



Σχήμα 4.120: Δευτερεύουσα ρωγμή κόπωσης στη ZMT στη ρίζα της συγκόλλησης στο δοκίμιο 16b ($\sigma_{\max} = 125$, $N_f = 2.808.411$).

Η συμπεριφορά της κατηγορίας αυτής των δειγμάτων σε κόπωση είναι αντίστοιχη αυτής του κράματος 2139 – T3. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.6 η αντοχή σε κόπωση των διαβρωμένων δοκιμίων έχει μειωθεί στο 1/2 σε σχέση με τα αδιάβρωτα δοκίμια.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Η έρευνα αυτή έδειξε ότι η συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της ενίσχυσης είτε στο πρόσωπο είτε στη ρίζα της συγκόλλησης παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή σε κόπωση των δειγμάτων. Επομένως το όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση μπορεί να αυξηθεί εφόσον περιοριστεί η δημιουργία ενίσχυσης κατά τη συγκόλληση ή εφόσον αφαιρεθεί μηχανουργικά η ενίσχυση μετά τη συγκόλληση.

Στην περίπτωση των αδιάβρωτων δοκιμών 2139 – T3, 2139 – T8 και 6156 – T4 το σημείο έναρξης της ρωγμής που οδήγησε τα δοκίμια σε αστοχία βρίσκονταν μέσα στη ZMT. Η ανάπτυξη των ρωγμών κόπωσης έγινε στη ZMT ενώ η διάδοσή τους στη λίμνη συγκόλλησης (ΛΣ). Υπήρξε ανάπτυξη δευτερευουσών ρωγμών κόπωσης στη ZMT τόσο στο πρόσωπο όσο στη ρίζα των δοκιμών στα οποία η σ_{max} ήταν μεγαλύτερη από 125MPa. Επίσης, στα δοκίμια αυτά παρατηρήθηκαν δύο περιοχές κόπωσης.

Στην περίπτωση των δειγμάτων τα οποία είχαν υποβληθεί σε διάβρωση πριν τη δοκιμή κόπωσης καθοριστικό ρόλο στην έναρξη της ρωγμής κόπωσης έχει η θερμική κατεργασία του κράματος. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των κραμάτων 2139 – T3 και 6156 – T4 η διάβρωση εντοπίζεται στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης. Οι ρωγμές της κόπωσης δημιουργούνται τοπικά στον πυθμένα των τρημάτων και στη συνέχεια διαδίδονται κάθετα προς τη διεύθυνση φόρτισης οδηγούμενες από την επιβαλλόμενη τάση κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στο κράμα 2139 – T8 η περιοχή της συγκόλλησης παραμένει ανεπηρέαστη από τη διάβρωση που εντοπίζεται στο μέταλλο βάσης. Οι ρωγμές της κόπωσης αρχίζουν να αναπτύσσονται εντός αυτής της περιοχής σε απόσταση περίπου 5 mm από το μέταλλο συγκόλλησης. Η ανάπτυξη δευτερευουσών ρωγμών κόπωσης στη ZMT είτε στο πρόσωπο είτε στη ρίζα των δοκιμών εμφανίστηκε στα δοκίμια όπου η σ_{max} ήταν μεγαλύτερη από 150MPa. Η μικροδομή του κράματος φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά αυτή λόγω έντονης παρουσίας φάσεων που αναπτύσσονται στα όρια των κόκκων του υλικού κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης σε as received καθώς και σε διαβρωμένα δοκίμια συγκολλήσεων laser των κραμάτων αλουμινίου 2139 – T3, 2139 – T8 και 6156 – T4.

Στα μη διαβρωμένα δείγματα η έναρξη της κύριας ρωγμής κόπωσης εντοπίζεται στη Ζώνη Μερικής Τήξης, με την ενίσχυση να παίζει καθοριστικό ρόλο λόγω της δημιουργίας εγχοπών στην επιφάνεια. Αντικείμενο προς μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει η προσπάθεια ελαχιστοποίησης της ενίσχυσης, είτε κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, είτε αφαιρώντας την μετά.

Αντίθετα στα διαβρωμένα δείγματα η θερμική κατεργασία του κράματος φαίνεται ότι επηρεάζει τη συμπεριφορά σε διάβρωση και κατά συνέπεια την αντοχή σε κόπωση. Αντικείμενο προς μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει ο διαφορετικός τρόπος διάβρωσης των δειγμάτων. Επίσης τα δείγματα θα μπορούσαν πρώτα να διαβρωθούν και ύστερα να υποστούν θερμική κατεργασία.

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία

- [1] Θ.Α. Διαμαντούδης, *Συγκολλήσεις Μετάλλων*, Θεσσαλονίκη 2000
- [2] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, εκδόσεις Τζιόλα, 2007
- [3] K.Masubuchi, *Analysis of welded structures*, MIT 1980
- [4] Μάκης Πολατίδης, *Μελέτη συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 με χρήση της μεθόδου TIG*, Διπλωματική εργασία ΤΜΜΒ, 2007

Δικτυακοί τόποι

- | | |
|--|-------------------------------|
| ➤ [5] www.alunet.gr | “aluNET” |
| ➤ [6] www.australwright.com.au | “Austral Wright Metals” |
| ➤ [7] www.key-to-nonferrous.com | “Key to non-Ferrous” |
| ➤ [8] courseware.mech.ntua.gr | “Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο” |

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000101106



